

TRABAJO DE FIN DE GRADO

Grado en Ingeniería Mecánica

**EVALUACIÓN DE EDIFICIOS DE MAMPOSTERÍA NO-
REFORZADA CON VARIABILIDAD DE PROPIEDADES
MECÁNICAS DE MATERIALES DE ALTURA**



Memoria y Anejos

Autor:	Marc Múrria Nogués
Director:	Jorge Arturo Ávila Haro
Co-Director:	Jose Ramón González Drigo
Convocatoria:	Octubre 2017



Resum

L'estudi de la capacitat i la vulnerabilitat sísmica és un tema principal pel que fa a l'àmbit de la construcció. En aquest treball s'ha analitzat un edifici de maçoneria no reforçada típic del barri de l'Eixample construït a finals del segle XIX i principis del segle XX. L'edifici en qüestió té 7 plantes i es va construir concretament l'any 1931.

El que es pretén amb aquest projecte es determinar les característiques de l'edifici actual i, a més a més, dur a terme una ampliació de nivells a l'edifici, obtenint com a resultat un edifici de nou plantes. L'interès en dur a terme aquesta pràctica es degut a que a Barcelona molts edificis varen canviar el seu projecte original afegint un, dos, tres i fins i tot quatre nivells extra a mesura que les ordenances municipals anaven evolucionant al llarg dels anys, cosa que fa que aquest recrescuts siguin comuns de veure al llarg de la ciutat.

Per obtenir la capacitat del nou edifici s'utilitzarà el model de l'edifici original ja modelitzat mitjançant el programa 3muri, un programa de càlcul estructural desenvolupat a la universitat de Gènova, Itàlia. En aquest estudi s'afegiran les dues plantes corresponents en forma de tres models de recrescuda diferents basant-se amb solucions aportades per edificis similars. Aquests nous models també s'han efectuat mitjançant el programa 3muri.

Per efectuar l'anàlisi s'ha seguit una metodologia estàtica no-lineal simplificada. Es compararan les corbes de capacitat obtingudes pels tres models amb la demanda sísmica possible en la zona d'interès d'acord a la consideració de diferents documents i estudis existents per aquesta.

Resumen

El estudio de la capacidad y la vulnerabilidad sísmica es un tema principal en el ámbito de la construcción. En este trabajo se ha analizado un edificio de mampostería no reforzada típico del distrito de l'Eixample construido a finales del siglo XIX y principios del siglo XX. El edificio en cuestión tiene 7 plantas y se construyó concretamente en 1931.

Lo que se pretende con este proyecto es determinar las características del edificio actual y, además, llevar a cabo una ampliación de niveles en el edificio, obteniendo como resultado un edificio de nueve plantas. El interés en llevar a cabo esta práctica se debe a que en Barcelona muchos edificios cambiaron su proyecto original añadiendo uno, dos, tres e incluso cuatro niveles extra a medida que las ordenanzas municipales iban evolucionando a lo largo de los años, lo que hace que este receridos sean comunes de ver a lo largo de la ciudad.

Para obtener la capacidad del nuevo edificio se utilizará el modelo del edificio original ya modelado mediante el programa 3muri, un programa de cálculo estructural desarrollado en la universidad de Génova, Italiano. En este estudio se añadirán las dos plantas correspondientes en forma de tres modelos de recerido diferentes basándose en soluciones aportadas por edificios similares. Estos nuevos modelos también se han efectuado mediante el programa 3muri.

Para efectuar el análisis se ha seguido una metodología estática no-lineal simplificada. Se comparará las curvas de capacidad obtenidas por los tres modelos con la demanda sísmica posible en la zona de interés de acuerdo a la consideración de diferentes documentos y estudios existentes para esta.

Abstract

The study of seismic capacity and vulnerability is a major issue in the field of construction. In this work we have analyzed a non-reinforced masonry building typical of the Example district. This structure was built in the late nineteenth and early twentieth centuries. The building in question has 7 floors and was built specifically in 1931.

The objective of this project is to determine the characteristics of the current building and, in addition, carry out an expansion of levels in the building that will get nine floors. The interest in carrying out this practice is caused that many buildings in Barcelona changed their original project. This changes were to add one, two, three and even four extra levels as the municipal ordinances evolved over the years, which causes this recurrence to be common throughout the city.

To obtain the capacity of the new building, the model of the original building already modeled will be used through the 3muri program, a structural calculation program developed at the University of Genoa, Italy. In this study, the two corresponding plants will be added in the form of three different reconstruction models based on solutions provided by similar buildings. These new models have also been carried out through the 3muri program.

To carry out the analysis a simplified non-linear static methodology has been followed. The capacity curves obtained by the three models will be compared with the possible seismic demand in the area of interest according to the consideration of different documents and studies existing there.



Agradecimientos

En primer lugar querría agradecer la contribución de mi director Jorge Ávila, que me ha guiado en todo momento con los pasos que tenía que seguir para realizar un buen trabajo. Especialmente querría agradecerle su dedicación incluso en los momentos en los que por motivos que escapan a nuestro control, no ha podido estar presente.

También a mi codirector José Ramón González Drigo por asesorarme y ayudarme cuando mi director no ha podido estar presente.

También a toda mi familia por apoyarme durante todos estos años, en las buenas y en las malas y a muchos de mis compañeros (ahora amigos) que han sido una parte importante en esta fase de mi vida



ÍNDICE

RESUM	I
RESUMEN	II
ABSTRACT	III
AGRADECIMIENTOS	V
1. PREFACIO	1
1.1. Origen del trabajo.....	1
1.2. Motivación	1
2. INTRODUCCIÓN	3
2.1. Objetivos del trabajo.....	3
3. INTRODUCCIÓN HISTÓRICA	5
3.1. Historia de Barcelona.....	5
3.1.1. Historia de l'Eixample, el plan Cerdà	7
3.1.2. Edificios en l'Eixample.....	11
3.1.3. Actualización normativa sísmica.....	14
3.1.4. Recrecido.....	14
4. ESTADO DEL ARTE	15
4.1. Capacidad.....	15
4.2. Metodología.....	15
4.2.1. Análisis estático no lineal	15
4.3. Análisis modal	18
5. EL EDIFICIO	21
5.1. Tipologías existentes.....	21
5.1.1. Tipología del edificio	23
5.2. Características constructivas	24
5.2.1. Muros y paredes	24
5.2.2. Suelos y forjados	24
5.3. Edificios similares recrecidos.....	25
6. EL MODELO	28
6.1. 3Muri.....	28

6.2.	Modelo edificio original	28
6.2.1.	Descripción del edificio.....	30
6.3.	Modelo recrecido 1.....	42
6.4.	Modelo recrecido 2.....	43
6.5.	Modelo recrecido 3.....	45
7.	DEMANDA	48
7.1.	Normativa Sísmica Española (NCSE-02)	49
7.2.	Irizarry	51
8.	RESULTADOS	55
8.1.	Curvas de capacidad	55
8.1.1.	Modelo 1.....	55
8.1.2.	Modelo 2.....	59
8.1.3.	Modelo 3.....	63
8.2.	Puntos de desempeño	65
8.3.	Curvas de fragilidad.....	70
8.4.	Comparativa	75
8.4.1.	Análisis modal.....	75
8.4.2.	Punto de desempeño	76
8.4.3.	Curva de fragilidad.....	80
8.4.4.	Estado de daño	81
	CONCLUSIONES	82
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	85
	OTRAS REFERENCIAS	86

1. Prefacio

1.1. Origen del trabajo

La idea del presente trabajo se originó en el despacho del departamento de estructuras. Yo no tenía ninguna idea de sobre qué tema hacer mi trabajo final de grado. Hablando con el profesor Jorge Arturo Ávila Haro y explicándome los estudios que se están realizando en dicho departamento surgió la idea de hacer un estudio sobre la vulnerabilidad sísmica en edificio históricos del barrio de l'Eixample. Más concretamente de realizar un recrecido en dicho edificio y realizar dicho estudio. A partir de ahí se barajó también la posibilidad de hacer un trabajo del edificio original sin recrecer pero modificando los materiales realizando un estudio estadístico sobre la calidad del material y en que pisos convendría usar los elementos de mayor calidad. Dicho trabajo no me pareció tan interesante por lo que se aparcó.

1.2. Motivación

Me decanté por realizar un recrecido en un edificio ya construido porque me pareció un tema más interesante que algún día podría llevarse a cabo. Por otro lado realizar un estudio estadístico sobre cómo se tendrían que haber utilizado los materiales, al fin y al cabo, no aporta nada nuevo como satisfacción personal

2. Introducció

Barcelona es una ciudad en continuo crecimiento. Desde que su extensión comenzó a mediados del siglo XIX, mediante el derribo de sus murallas y la concepción y construcción del distrito de l'Eixample, la población nunca ha parado de crecer. Poco a poco la ciudad llegó a otros núcleos urbanos como Sants o Gracia, hasta que dio lugar a la ciudad que actualmente conocemos, una ciudad con una gran densidad de población que requiere de igual forma acoger a nuevos habitantes.

Lo anterior dió lugar a la idea de hacer edificios con más niveles, a medida que se iban actualizando Ordenanzas constructivas de la Ciudad. No fue hasta 1960 en que la primera Normativa Española que consideraba la acción sísmica fue introducida. Anteriormente se construyeron muchos de los edificios del distrito de l'Eixample sin tener en cuenta las fuerzas horizontales inducidas por la actividad sísmica del terreno, muchos de los cuales actualmente tienen más de 100 años. De ahí se pasó a modificar estos edificios históricos haciendo remotes de plantas según la normativa de ese periodo.

En relación a la acción sísmica, aunado a la Normativa Sísmica Española (NCSE-02, 2002), también se cuenta con el actual EuroCódigo en su apartado 8 (EC8, 1996), así como estudios más recientes de microzonación de la Ciudad (Irizarry, 2004).

El estudio que se realizará en este proyecto es precisamente sobre la práctica de realizar recrecidos en este tipo de edificios históricos del barrio de l'Eixample, tomando en cuenta los resultados obtenidos a partir de los estudios de microzonación en lo que a la demanda respecta. El edificio elegido es una estructura representativa del distrito de l'Eixample, es decir, un edificio de mampostería no reforzada de los años 30 con 7 niveles, ideando un recrecido de 2 pisos adicionales. El estudio se realizará con 3 variantes de recrecidos distintos, obteniéndose las curvas de capacidad correspondientes, así como las curvas de capacidad e índice de daño, de acuerdo a diversos estados de daño previamente seleccionados.

2.1. Objetivos del trabajo

Determinar la vulnerabilidad sísmica de edificios de mampostería no-reforzada representativos del distrito de l'Eixample en la ciudad de Barcelona, España tomando en cuenta la variabilidad de las propiedades mecánicas de sus materiales.

Determinar el impacto y establecer la correlación en la respuesta del edificio de interés al incrementar el número de niveles, tal como se hace en una gran cantidad de estos edificios una vez terminados.

Aprendizaje y utilización de programas de cálculo estructural adecuados para este tipo de estructuras, así como el tratamiento de los resultados mediante herramientas como MATLAB y metodologías internacionales simplificadas.

3. Introducció històrica

3.1. Historia de Barcelona

La relació entre Barcelona i els pobles dels voltants era molt intensa. En la **Figura3.1** se mostra la distribució geogràfica de Barcelona per aquell entons, dins de la muralla.

Debido al crecimiento de la población, Barcelona quedaba recluida en su propia muralla, tal como se muestra en la **figura3.1**, por lo que necesitaba expandirse. Entre 1854 y 1856 se procedió a derribar la muralla de la ciudad para que la ciudad pudiera crecer viablemente. Pero no fue hasta el año 1859 que el consistorio barcelonense convocó un concurso de proyectos urbanísticos para la ampliación de la ciudad. El ganador de dicho concurso fue el proyecto de Rovira y Trias. De forma paralela el Gobierno central encargó un proyecto al ingeniero Ildefons Cerdà; el Gobierno impuso este plan mediante un decreto que anulaba la decisión del Ayuntamiento de Barcelona. Esta intromisión no fue del agrado de la ciudad, pese a que proponía un proyecto mejor. Barcelona se oponía el Plan Cerdà porque suponía una medida centralista del Gobierno de Madrid y porque desaprovechaba mucho espacio, que se destinaba a zonas verdes. El plan Cerdà no estaba pensado solo por el espacio que ocupa el distrito de l'Eixample actualmente; planteaba un Eixample entre Montjuïc y el río Besòs, incluyendo Sant Martí [<http://lameva.barcelona.cat/eixample/ca/historia-del-districte>, (2017)].



Figura3.1: Casco histórico ciudad de Barcelona, recluido en su muralla

L'Eixample se construyó en los años de la industrialización de Cataluña, a finales del siglo XIX e inicios del siglo XX. La parte central, la Dreta de l'Eixample era el barrio de la burguesía en el que se introdujo el modernismo de aquella época. A pesar de eso, un buen número de edificios significativos de otros barrios tales como el Fort Pienc, la Sagrada Família, Sant Antoni o l'Esquerra de l'Eixample fueron influidos también por este movimiento. L'Eixample entero constituye un conjunto arquitectónico modernista único en Europa.

3.1.1. Historia de l'Eixample, el plan Cerdà

Con su plan urbanístico, Cerdà quería diseñar una ciudad igualitaria, en la que no se diferenciases unos barrios de otros por las condiciones de vida impuestas.

El plan Cerdà se basaba en una gran red de calles perpendiculares y traveseras, todas ellas uniformes, exceptuando dos vías sesgadas superpuestas (la Diagonal y la Meridiana) y la Gran Via de les Corts Catalanes. El punto donde se encontraban estos grandes ejes era el gran centro de comunicaciones de l'Eixample, donde se construyó la plaza de Les Glòries Catalanes. Con un gran rigor, el ingeniero previno el repartimiento uniforme de zonas de servicio, como mercados, centros sociales e iglesias, además de grandes parques [art. *Las nuevas tipologías en la construcción de la Barcelona de Cerdà o un catálogo de arquitectura de la ciudad industrial, 1855-1888*].

Las manzanas no eran del todo cuadradas, puesto que para facilitar la visibilidad las esquinas eran recortadas en forma de chaflán, tal y como se puede observar en la **Figura 3.2**. En la **Figura 3.3** se muestra una imagen tomada desde el cielo con la que se puede observar la distribución real de las islas en la actualidad. En el interior de las manzanas solo se permitía construir en uno o dos costados y el espacio restante se dejaban para el jardín de vecinos (**Figura 3.4**). Las casas no debían tener más de 3 pisos (unos 16 metros de y tampoco debían de ser muy profundas (**Figura 3.5**). Cerdà lo ideó así porque consideraba que la salud de los ciudadanos dependía de una situación en la que el aire limpio circulase fácilmente por los jardines y en el que las casas tuvieran una buena iluminación. En su segunda etapa de construcción (**Figura 3.7**), los edificios llegaban a

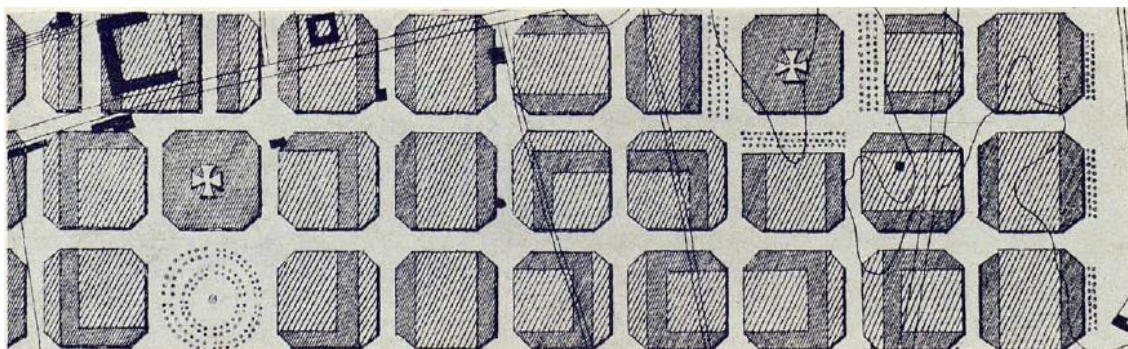


Figura3.2 Tejido urbano formado de las típicas islas o manzanas de "l'Eixample". [art. *Las nuevas tipologías en la construcción de la Barcelona de cerdà o un catalogo de arquitectura de la ciudad intustrial, 1855-1888*].



Figura3.3: Tejido urbano formado de las típicas islas o manzanas de "l'Eixample". [Google Earth]

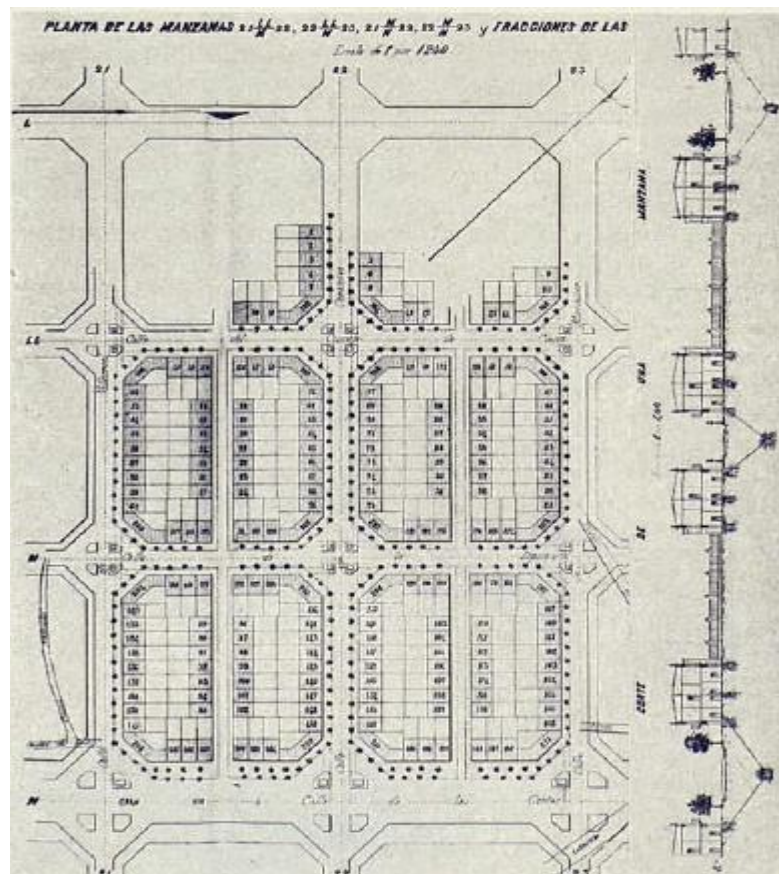


Figura 3.4: Estructura de las islas de "l'Eixample". [art. *Las nuevas tipologías en la construcción de la Barcelona de cerda o un catalogo de arquitectura de la ciudad intustrial, 1855-1888*].

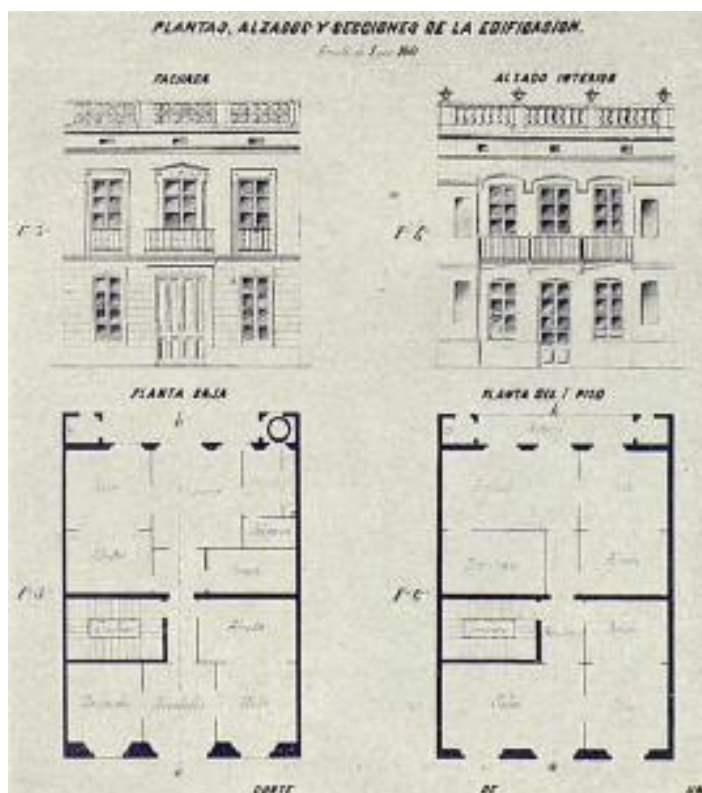


Figura 3.5: Estructura de las casas ideadas por Cerdà. [art. *Las nuevas tipologías en la construcción de la Barcelona de Cerdà o un catálogo de arquitectura de la ciudad industrial, 1855-1888*].

Por lo que respecta a los jardines, sumándose a los que había en las manzanas de edificios y los árboles de las calles, en cada barrio se construía un gran parque de entre cuatro y ocho manzanas de extensión (**Figura 3.6**).

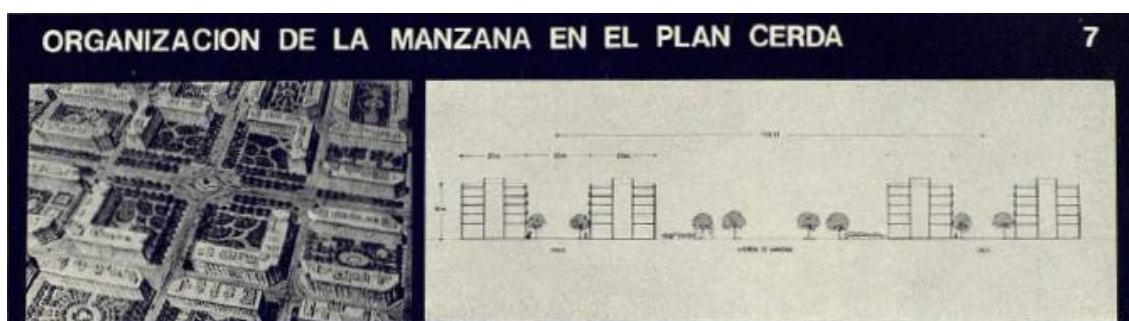


Figura 3.6: Organización de la manzana del plan Cerdà, parques y vegetación [art. *Las nuevas tipologías en la construcción de la Barcelona de Cerdà o un catálogo de arquitectura de la ciudad industrial, 1855-1888*].

A pesar de que en ese momento no era concebible imaginarse la existencia de automóviles en un futuro, se dejaron calles muy espaciosas, por donde podían circular los coches y tranvías a caballo. En definitiva, Cerdà quería una ciudad donde se evitara la aglomeración de casas de la ciudad tal y como se conocía.

La arquitectura modernista mezclaba las nuevas técnicas y los nuevos materiales de ese momento con el uso de recursos que proporcionaban las diversas técnicas decorativas tradicionales.

3.1.2. Edificios en l'Eixample

La construcción de los edificios fue realizada entre el 1860 y el 1940, con 25 edificios en promedio por cada manzana en la que la mayor parte de la edificación era de estructuras de mampostería no-reforzada. Debido a que los diseños eran previos a la publicación de la primera normativa sísmica en España, estos edificios no tenían ninguna consideración sísmica en el diseño estructural. A partir de los 60, se construyeron edificios de hormigón armado, los cuales sustituyeron edificios de mampostería no-reforzada que ya habían cumplido su vida útil y fueron demolidos. Este tipo de edificios presentan una estructura de pilares y losas reticulares, sistema que ha sido identificado como altamente vulnerable frente a la acción sísmica. El tercer tipo de edificios presentes en la zona de l'Eixample son estructuras metálicas, aunque son muy minoritarios [Josep Emilo Hernandez-Cros, Gabriel Mora, Xavier Pouolana, Art. *La construcción de la ciudad de Barcelona 1716-1977*].

De ese modo, el edificio típico en el distrito de l'Eixample es el de mampostería de ladrillo no reforzada, con forjado de vigueta de madera, hormigón armado y/o acero, según la época de su construcción, y bovedillas prefabricadas o hechas manualmente. Los edificios construidos en banda dentro de la manzana tienen una vista en planta muy regular, generalmente en forma de rectángulo. En cambio los edificios que dan en las esquinas tienen una forma pentagonal. El primer piso de estos edificios tiene una altura superior al de cualquier otro nivel del mismo edificio. Esto se debe a que estas plantas bajas están destinadas a actividades comerciales por lo que requieren un espacio más versátil al de una vivienda. El número de niveles del modelo tipo de l'Eixample varía entre 4 y 7 plantas (**Figura 3.7**). Su sistema resistente consiste en muros de ladrillos con espesores de 30cm en las fachadas y 15cm en los demás muros importantes. En el sótano y la planta baja es muy común el ver pilares de fundición y jácenas, donde se apoyan los muros portantes de la estructura. Los pilares se apoyan en un dado, el cual a su vez se apoya en una zapata de mampostería con mortero de cal o en la propia cimentación corrida, dando lugar a conexiones entre estos elementos que pueden ser considerados como nodos muy deformables (casi articulados) [Josep Emilo Hernandez-Cros, Gabriel Mora, Xavier Pouolana, Art. *La construcción de la ciudad de Barcelona 1716-1977*].

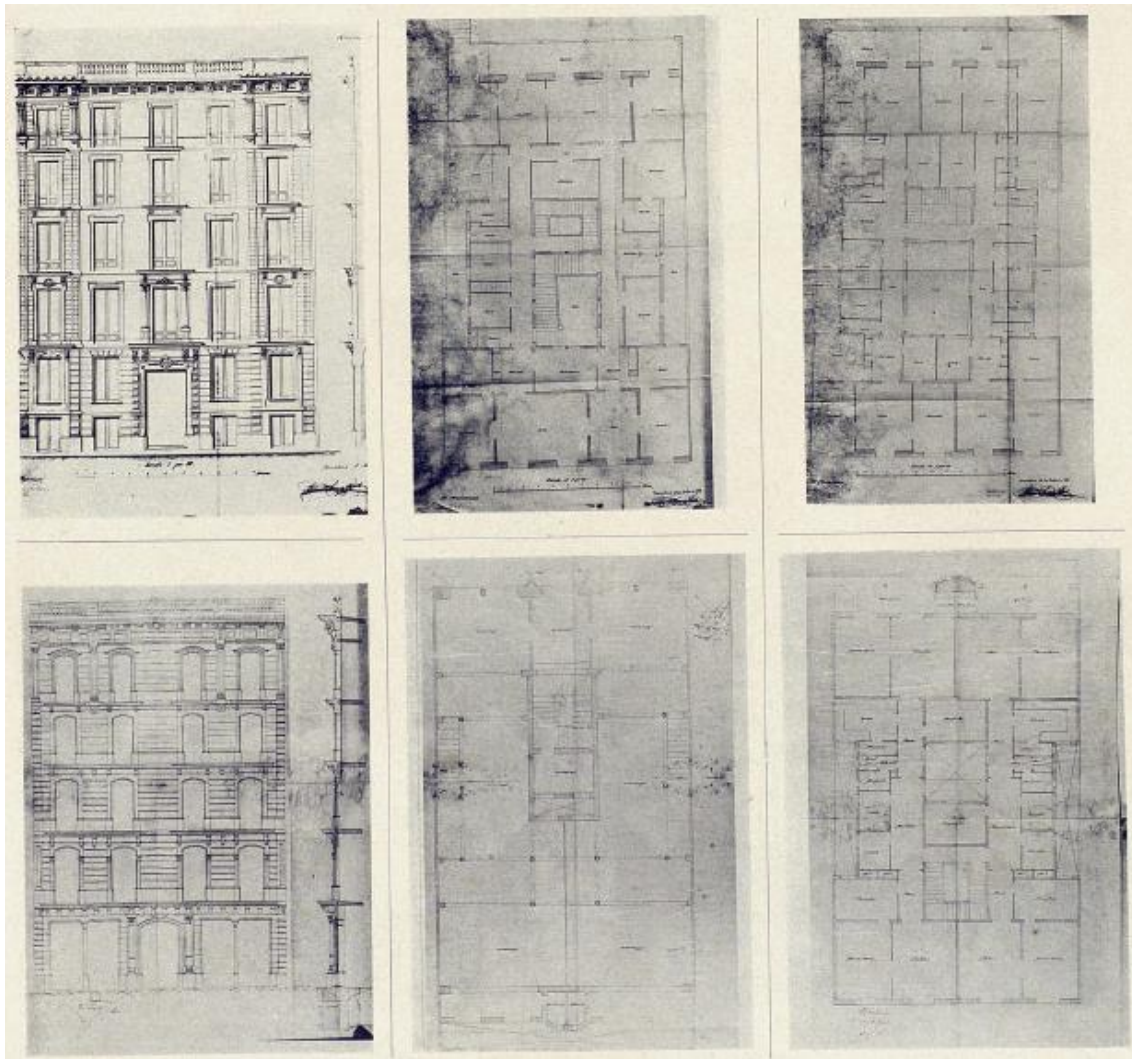


Figura 3.7: Estructura de las casas ideadas por Cerdà en su segunda etapa. [art. *Las nuevas tipologías en la construcción de la Barcelona de Cerdà o un catálogo de arquitectura de la ciudad industrial, 1855-1888*].

Los forjados suelen ser de dos tipos: para las dos primeras plantas, se utilizan forjados de viguetas metálicas y bovedilla cerámica simplemente apoyada en jácenas metálicas y pilares de fundición o bien en paredes. Encima de las bovedillas se colocan los cascotes y sobre ellos el mortero de cal y el pavimento (**Figura 3.8**).

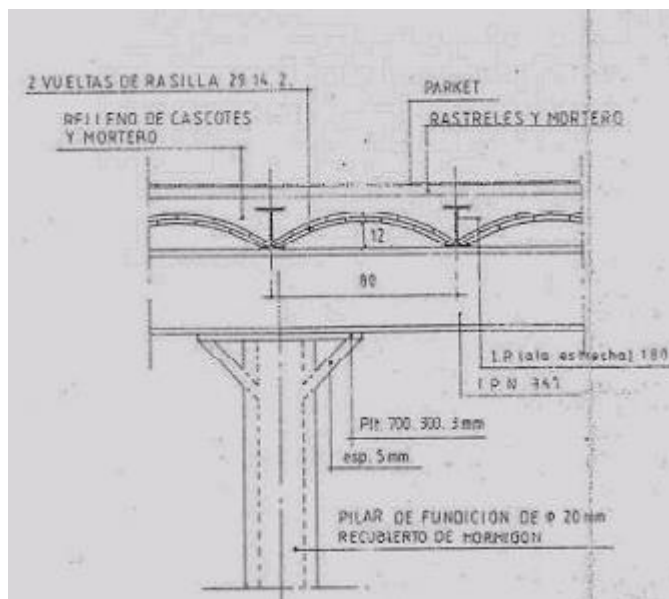


Figura 3.8: Detalle del forjado de vigueta metálica y bovedilla cerámica tomado de los planos arquitectónicos originales del edificio de 6 niveles

Para las demás plantas, el tipo de forjado es de vigueta de madera y bovedilla cerámica, formando por dos hojas de rasilla, sobre la que se rellena con cascotes, mortero de cal y pavimento (Figura 3.9).

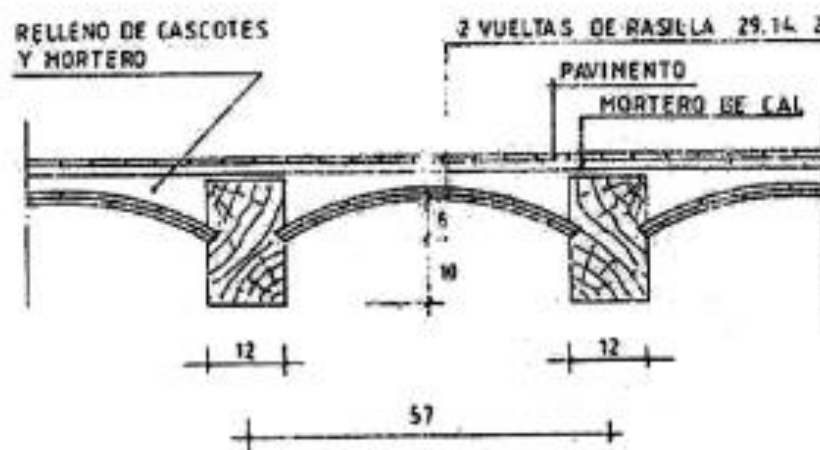


Figura 3.9. Detalle del forjado de vigueta de madera y bovedilla cerámica tomado de los planos arquitectónicos originales del edificio de 6 niveles [].

3.1.3. Actualización normativa sísmica

Como se ha explicado anteriormente, las primeras edificaciones de l'Eixample no tenían ninguna consideración sísmica debido a que no se había regulado ninguna normativa. Fue en el año 1962 que se creó una Comisión Interministerial encargada de formular las Normas sismo resistente y cuyo trabajo cristalizó en la Norma Sismo resistente PGS-1 (1968). Asimismo, en 1967 el Ministerio de Obras Públicas publicó la "Instrucción para Proyecto, Construcción y Explotación de Grandes Presas", en las que se tienen en cuenta las acciones sísmicas.

A partir de ese momento, la normativa sismo resistente fue evolucionando y actualizándose hasta la actualidad dando lugar a la NCSE-94 (1995) y finalmente NCSE-02 (2002) [https://www.fomento.gob.es/MFOM/LANG_CASTELLANO/ORGANOS_COLEGIADOS/MASORGANOS/CPNS/NORMATIVA/].

3.1.4. Recrecido

El continuo crecimiento de la población provocó que las 3 plantas ideadas por Cerdà no fueran suficientes. El estudio de la actividad sísmica de España y la correspondiente actualización de la normativa, dio lugar a práctica de construir edificios con más niveles según pasaban los años, a la par que se iban modificando los primeros edificios.

4. Estado del arte

4.1. Capacidad

La capacidad estructural es la habilidad que tiene una estructura o edificio para soportar cargas o acciones externas (sísmicas en el caso de este estudio), manteniendo su integridad estructural dentro de unos límites. Esta depende de la capacidad de resistencia y deformación de los elementos individuales que la componen. La capacidad estructural se puede obtener mediante diferentes metodologías [J. Ávila-Haro, 2016].

4.2. Metodología

Existen dos procedimientos analíticos para evaluar la forma en que la estructura diseñada tenga la capacidad de resistir las demandas generadas por un sismo: los métodos elásticos o lineales y los métodos inelásticos o no-lineales.

- Los métodos lineales proporcionan un buen indicador de la capacidad elástica de las estructuras, además de mostrarnos en qué lugar se produce la primera fluencia. A pesar de eso tienen el problema de no poder predecir los mecanismos de falla, además de no tener en cuenta la distribución de fuerzas durante la fluencia progresiva [J. Ávila-Haro, 2016].
- Los métodos no-lineales ayudan a explicar cómo trabajan los edificios realmente mediante la identificación de los modos de falla y el potencial para un colapso progresivo [Martínez Castillo, 2009].

4.2.1. Análisis estático no lineal

Para este tipo de análisis hay un gran número de metodologías diferentes, teniendo todas ellas en común el principio de enfrentar la capacidad con la demanda. Estos dos parámetros se representan en un gráfico, dando como resultado una intersección denominada punto de desempeño. Dicho punto explica el desplazamiento esperado para la estructura ante un determinado evento (**Figura4.1**).

Mediante un análisis estático no-lineal o push-over se obtienen las curvas de capacidad, después de un previo estudio modal de la estructura. Estas curvas son una representación del cortante que se presenta en la base del edificio respecto el desplazamiento de un nodo de control normalmente ubicado en el centro de masas del nivel superior (**Figura4.1**).

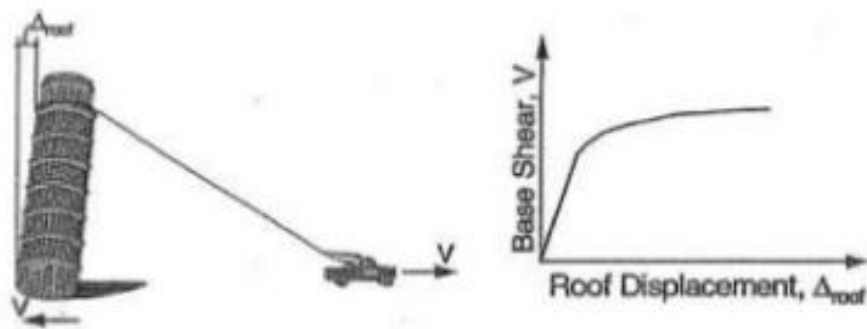


Figura 4.1: Ejemplo de una curva de capacidad o push-over [Edgar Mora Martínez, 2015]

Para poder comparar las gráficas de demanda sísmica y curva de capacidad tienen que estar en las mismas unidades. Para conseguir eso se siguen las directrices de la metodología N2 ideada por Fajfar (1999). Este proceso consiste en transformar la curva de capacidad a coordenadas espectrales para poder representar la capacidad en un formato bilineal simplificado (**Figura 4.3 y Figura 4.4**) y conseguir así una representación en la que se identifican fácilmente los diferentes estados de afectación o estados de daño.

Como idea principal del método N2, Fajfar propone transformar la curva pushover obtenida. El modelo estructural original consta de múltiples grados de libertad (MDOF, siglas en inglés), y esta pasa a ser un sistema equivalente de un solo grado de libertad (SDOF), para obtener así el modelo de representación bilineal que se ha expuesto anteriormente (**Figura 4.2**).

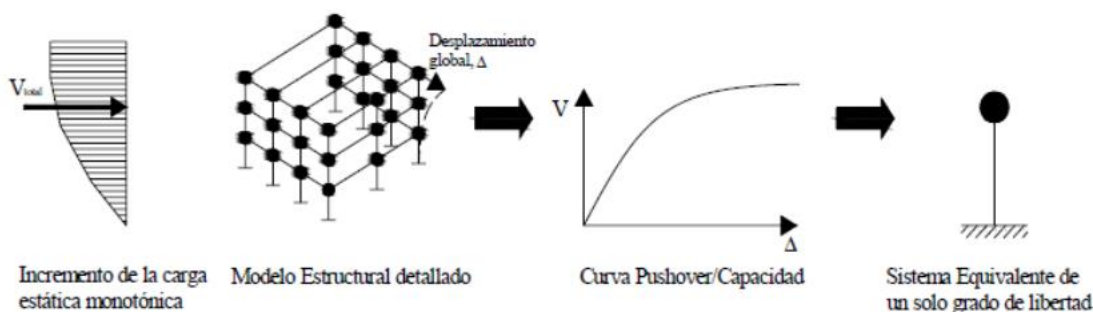
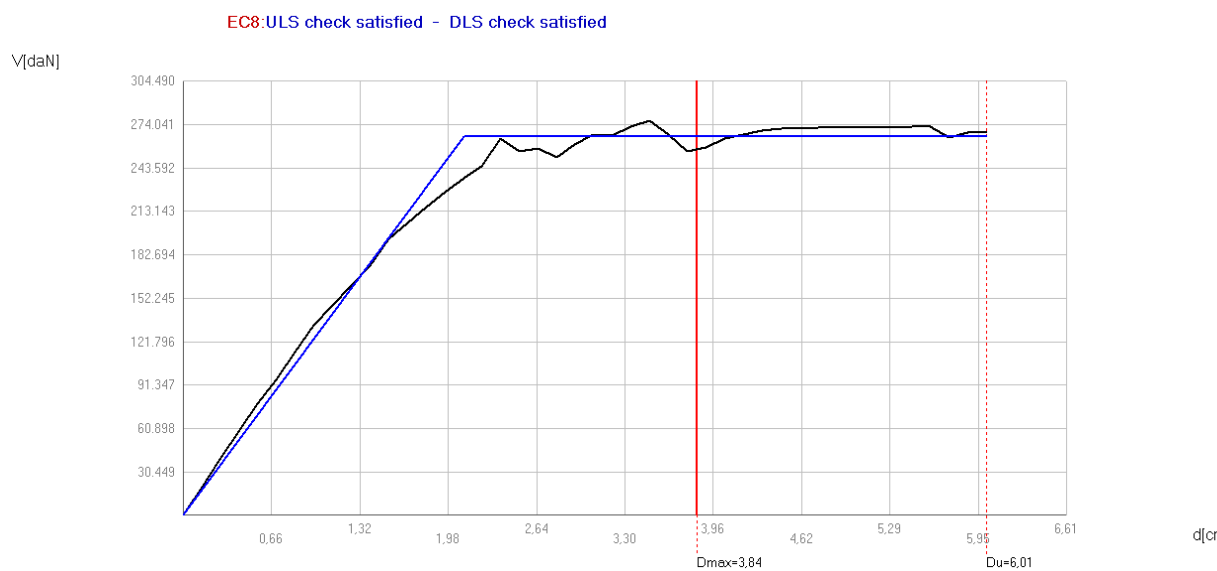
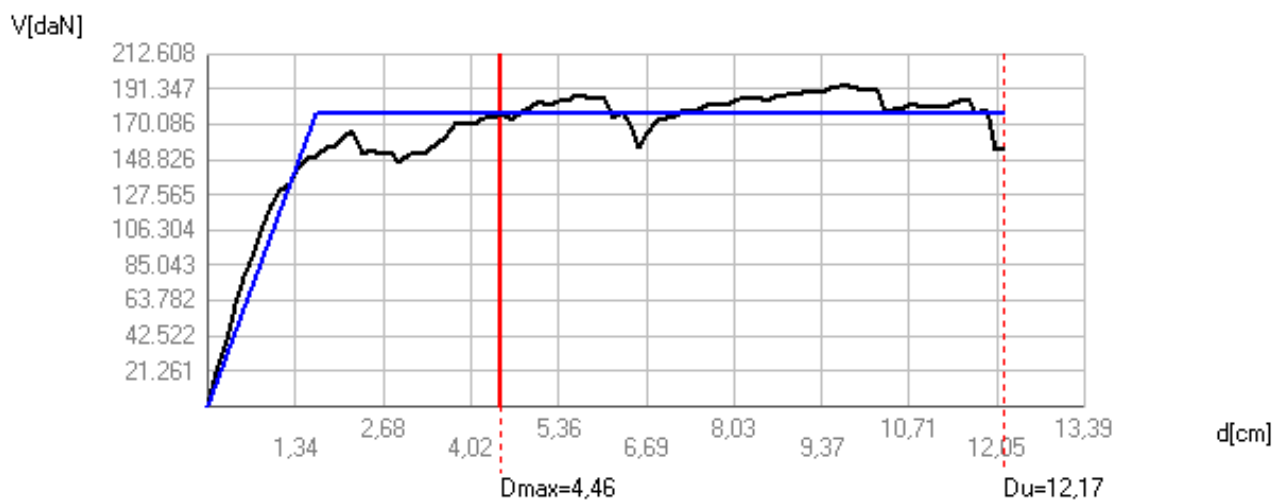


Figura 4.2: Proceso del método push-over y la metodología N2 para obtener un sistema simplificado equivalente [Nicolas Guevara Morales, 2006]



4.3. Análisis modal

El análisis modal lo que pretende es simplificar la deformación compleja de una estructura en una serie de modos de deformación con sus respectivos parámetros de frecuencia, obteniendo de este modo un sistema de modos que definen el comportamiento de la estructura.

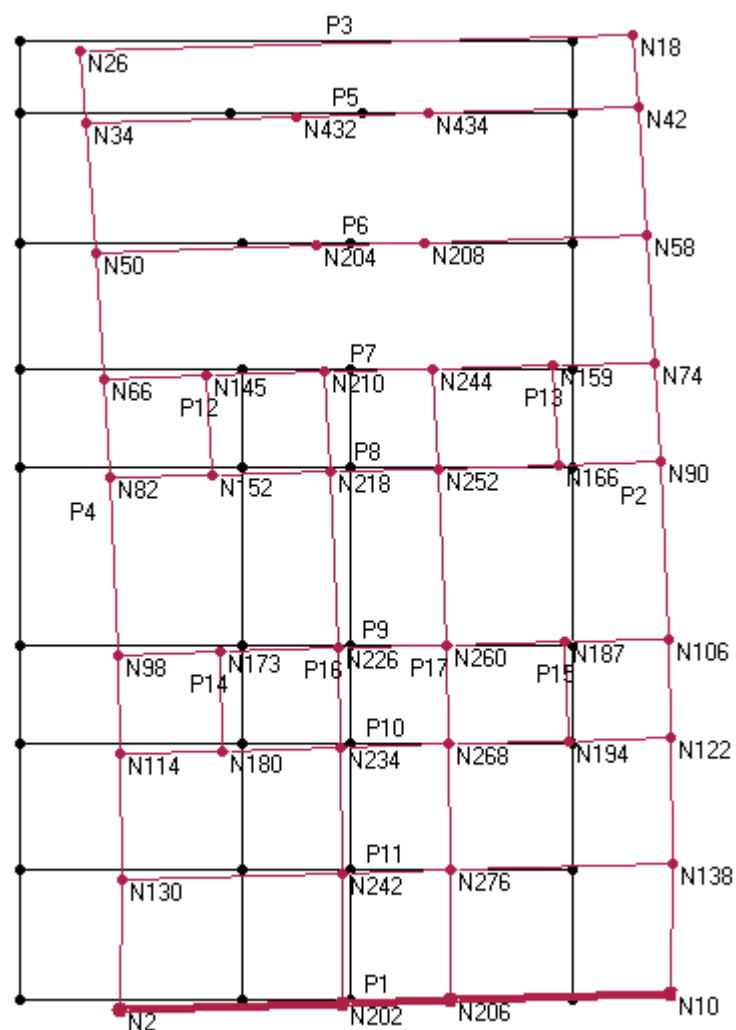
Para poder afirmar que la hipótesis del método N2 es correcta, es necesario recoger los resultados del análisis modal del edificio original hecho previamente con 3muri [Tabla1]. Para más detalle, consultar el trabajo [R. Gonzalez-Drigo, J. Avila-Haro, L.G. Pujades and A.H. Barbat, *Non-linear static procedures applied to high-rise residential URM buildings* (2016)].

En dicha tabla se puede observar como en los 3 primeros modos la masa movida es superior al 70%-80%, en las dos direcciones (X e Y). Para el caso en concreto el total de masa que es movida en la dirección X es del 98,2% y el porcentaje de la masa en la dirección Y es 93,06%. Dado estos resultados se pueden despreciar los siguientes modos y queda demostrado que el comportamiento estructural predominante es el del primer modo.

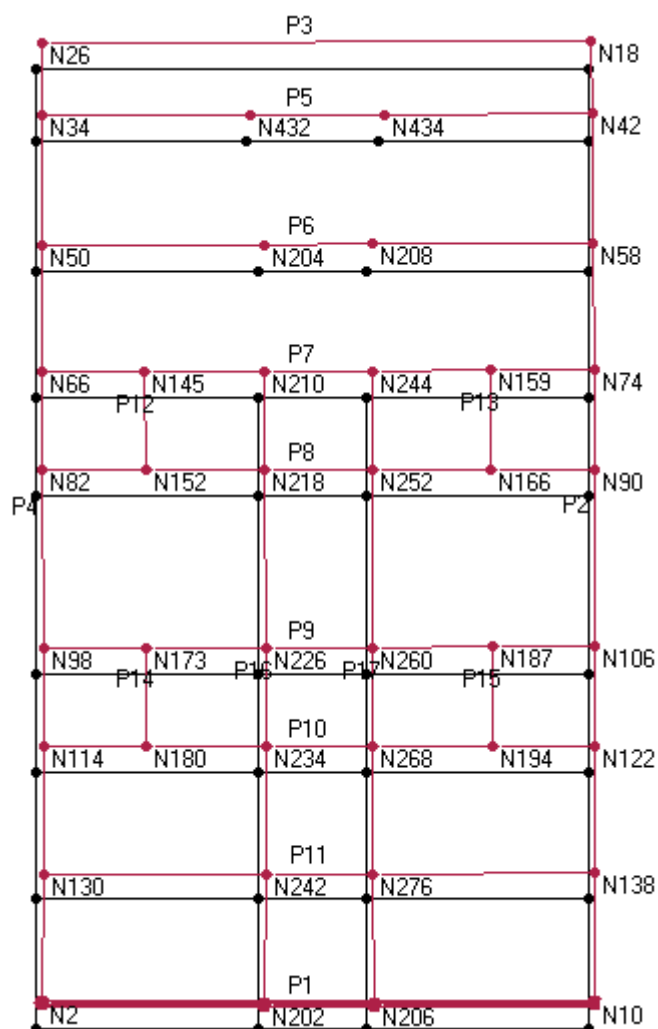
Tabla1: Análisis modal del edificio

Dir.	Modo	T [s]	mx [kg]	Mx [%]	my [kg]	My [%]	mz [kg]	Mz [%]
X	1	0,63718	2167591	86,18	9263	0,37	8	0
	2	0,22617	270127	10,74	2	0	4	0
	3	0,11	32234	1,28	69	0	43	0
Y	1	0,64108	10,793	0,43	1853879	73,71	4	0
	2	0,21201	0	0	362514	14,41	6	0
	3	0,12182	47	0	124135	4,94	1743	0,07

Con el análisis modal también se obtiene el periodo natural del edificio de cada modo. En las **Figuras4.5** y **Figuras4.6** se muestra como se desplaza el edificio en X y en Y respectivamente para el modo 1.



Figuras4.5: Análisis modal en la dirección X



Figuras4.6: Análisis modal en la dirección Y

5. El edificio

El estudio trata de un edificio tipo de mampostería no reforzada de la zona del Eixample, representativo de la época de construcción comprendida entre finales del siglo XIX e inicios del siglo pasado. El proyecto original del edificio consta de 7 pisos, una planta baja y 6 plantas tipo por encima.

En el modelo se propone añadir 2 pisos más al proyecto original mediante la herramienta 3MURI y realizar el estudio pertinente sobre su vulnerabilidad sísmica. Primero se explicará la tipología del edificio en su estado actual.

5.1. Tipologías existentes

De acuerdo a su posición en la manzana y la existencia de edificios colindantes a los lados (**Figura5.1**), se pueden diferenciar distintas tipologías características del distrito de L'Eixample en base a otros factores, dentro de los cuales podemos mencionar [**C. Cornadó Bardón, 2009**]:

- Ubicación de la caja de escaleras: esta ubicación puede ser central (C) o adosada a una pared lateral (L). La situación de la escalera repercutirá en la disposición de otros muros estructurales.
- Existencia de patios en la medianera: a medida que la parcela aumenta el ancho se requieren patios extra adosados en las paredes medianeras para facilitar la iluminación y la ventilación.
- Existencia de patios en profundidad: a medida que la planta del edificio aumenta su profundidad es necesario añadir más de un patio de luces en la zona central del edificio para facilitar la iluminación y la ventilación.

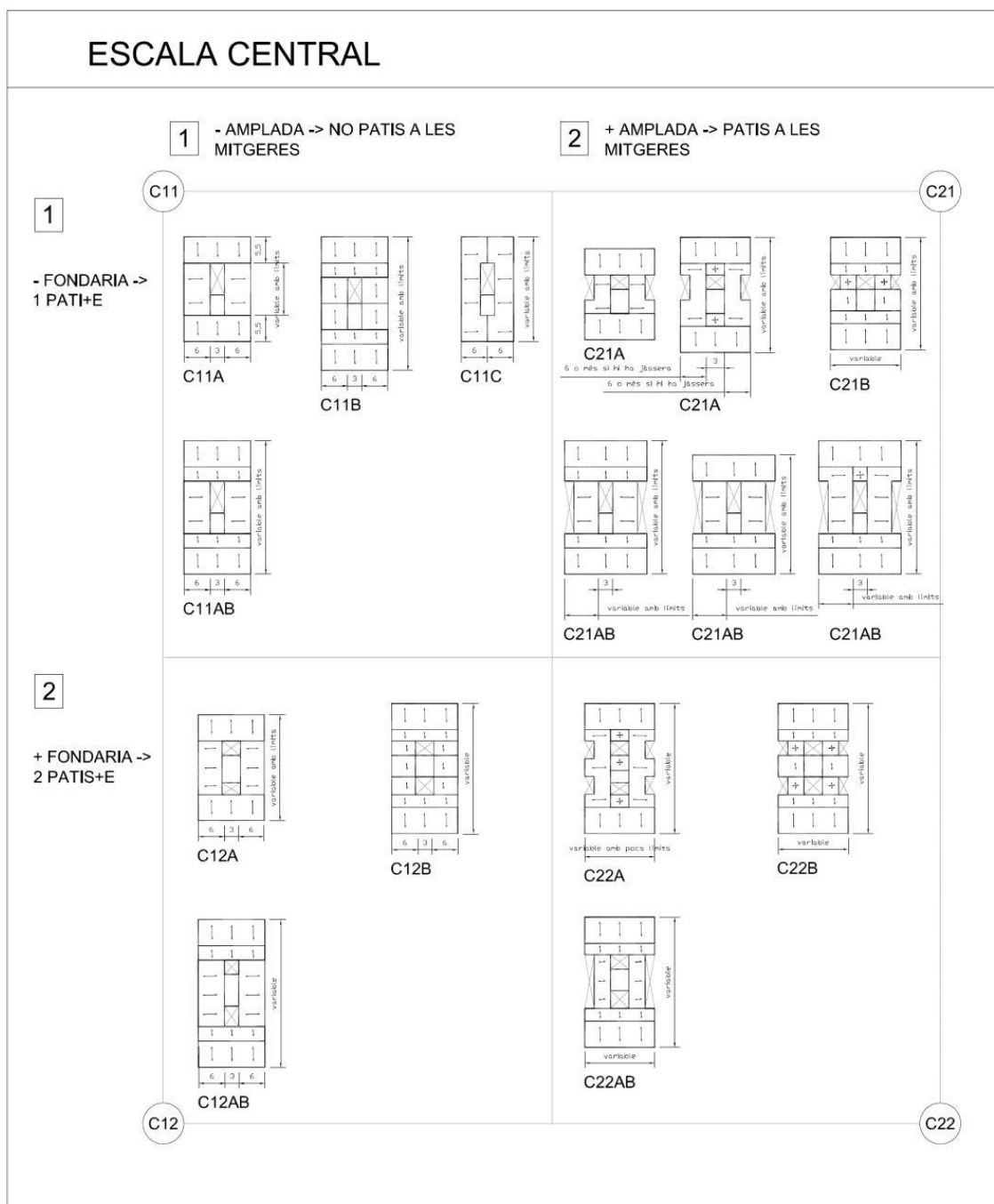


Figura 5.1: Esquema del tipo de edificio en función de la ubicación de la caja de escaleras, patios de luces y dimensión de la planta. [C. Cornadó Bardón, 2009]

5.1.1. Tipología del edificio

La tipología del edificio escogido para este estudio es del tipo C22B (**Figura5.2**). Este tipo se da en casos de parcelas grandes. Tiene la caja de escaleras centrada en el edificio y al tratarse de una planta profunda requiere la implementación de un segundo patio de luces. Los dos patios están distribuidos alrededor de la escalera de vecinos (uno delante y el otro detrás). Requiere además patios extra en las medianeras debido al ensanche de la planta. En el caso de este edificio hay construido un 3er patio de luces, esta vez trasero [C. Cornadó Bardón, 2009].

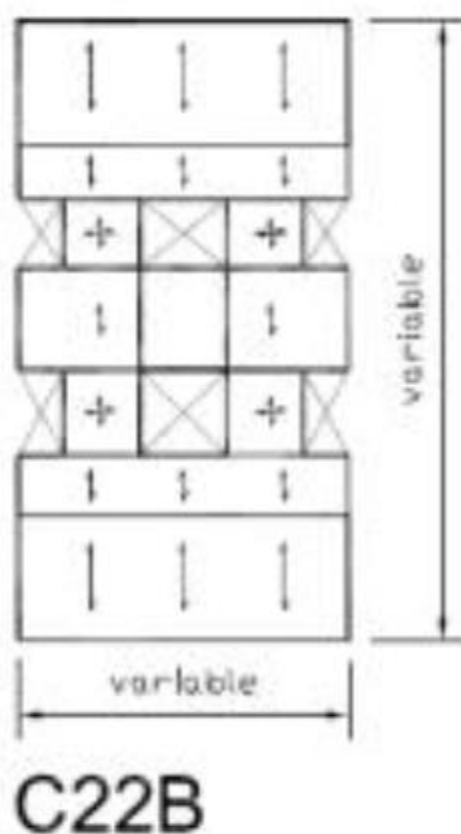


Figura5.2: Edificio tipo C22B, con caja de escaleras y 2 patios de luces centrales. [C. Cornadó Bardón, 2009]

5.2. Características constructivas

5.2.1. Muros y paredes

Independientemente de la tipología del edificio mencionado anteriormente, las principales paredes portantes son las fachadas y las medianeras. En la planta baja no es extraño el uso de vigas o jácenas metálicas o columnas metálicas para generar más espacios abiertos para los usos de planta como comercios y restauración. Los patios de luces están cerrados por muros de mampostería que a su vez hacen de elementos de soporte. Finalmente, como división interna para los pisos, se usan paredes de mampostería con un espesor de 10 cm aproximadamente. Estos muros son denominados tabiques y su única función es la de separar zonas dentro de una planta, como ya se ha mencionado anteriormente. Estos muros no soportan ningún tipo de carga estructural.

Las aperturas están presentes en los muros que están en contacto con los patios de luces y en las fachadas frontales y posteriores. Para la protección del muro debido a la apertura se colocan viguetas las cuales reparten la fuerza rodeando la zona de la apertura. **(Avila-Haro et al., 2016).**

5.2.2. Suelos y forjados

La mayoría de edificaciones de mampostería no reforzada del distrito de l'Eixample fueron construidas entre el 1860 y el 1960. El tipo de forjado predominante fue el forjado unidireccional, con la diferencia entre ellos por los materiales según la época de construcción. Aproximadamente entre los años 60 y 90 del siglo XIX los pisos eran forjados de madera unidireccional con planchas de madera incluyendo un revestimiento de hormigón adicional. Durante el siguiente periodo de tiempo (hasta aproximadamente el 1940) se utilizaban vigas de hierro y bóvedas de ladrillo. A partir de los años 40 del siglo pasado las vigas eran de hormigón armado y las bóvedas de ladrillo o bloques de cerámica **(Avila-Haro et al., 2016).**

5.3. Edificios similares recrecidos

Como se ha dicho previamente, el estudio consiste en recrecer el edificio actual añadiéndole 2 pisos más y determinar los efectos de dicha modificación. Para llevar a cabo tal obra previamente se ha observado el recrecido de varios edificios históricos del Eixample con características similares al edificio modelo.

Características como el año de construcción, recrecimiento relativamente moderno, mismo tipo de edificio (C12B), el número de pisos antes del recrecimiento, la cantidad de pisos del recrecido y el total de plantas final, entre otros. El objetivo era aprender qué soluciones se implementan en cada uno de esos proyectos y encontrar la mejor solución para el edificio del modelo.

A continuación se mostrará unos cuantos ejemplos de edificios similares ya recrecidos:



Figura5.3: Edificio C/Vilamarí 25. [<http://www.ecbarquitectura.com/#/>]

Adreça: GV CORTS CATALANES 521

DADES GENERALS

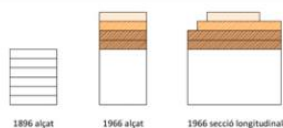
EDIFICI ORIGINAL

Any de construcció: 1896
M.O. - Arquitecte/s: A. Baixeras Camps
Núm. plantes: pb+5
Alçada façana: 22m
Marc normatiu: 1891
Alçada reguladora: pb+5 (22m)

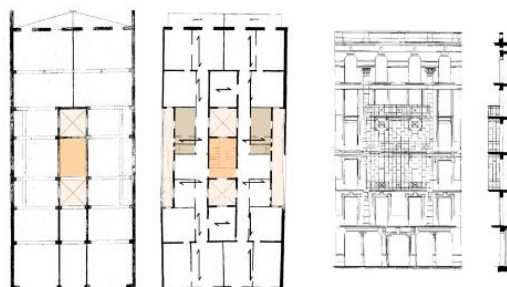
PROJECTE DE REMUNTA/ES

Any de remunta/es: 1966
M.O. - Arquitecte/s: Mariano Martín Carreras
Plantes de remunta: +2 +A+SA
Alçada façana final: 27,45m
Marc normatiu: 1958
Alçada reguladora: pb+7 (27,45m) +A+SA
Superfície solar: 466 m²
Superfície construïda: 2.839 m²
Ref. cadastral: 9617106DF2891F0001FG

ESQUEMA VOLUMÈTRIC



TIPOLOGIA



1896 planta baixa | planta tipus | façana i secció edifici original

Figura5.4: Edificio GV de les corts catalanes 521. [http://www.ecbarquitectura.com/#/]

Adreça: C. SEPÚLVEDA 177

DADES GENERALS

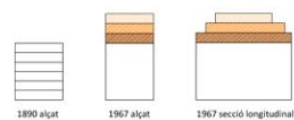
EDIFICI ORIGINAL

Any de construcció: 1890
M.O. - Arquitecte/s: Celestí Teixidó
Núm. plantes: pb+5
Alçada façana: 20,35m
Marc normatiu: 1891
Alçada reguladora: pb+5 (22m)

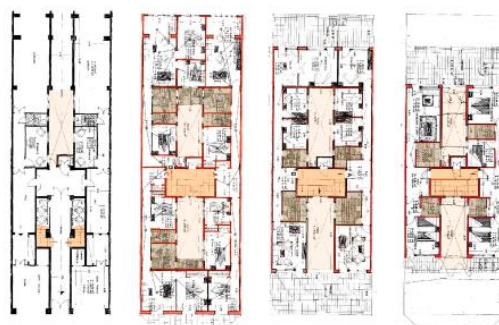
PROJECTE DE REMUNTA/ES

Any de remunta/es: 1967
M.O. - Arquitecte/s: Francisco de A. Sauri
Liadó
Plantes de remunta: +1 +A+SA
Alçada façana final: 24,40m
Marc normatiu: 1947
Alçada reguladora: pb+7 (24,40m) +A+SA
Superfície solar: 539 m²
Superfície construïda: 2.525 m²
Ref. cadastral: 0019117DF3801G0002TQ

ESQUEMA VOLUMÈTRIC



TIPOLOGIA



1967 planta baixa | planta 6a | planta àtic | planta sobreàtic

Figura5.5: Edificio GV de les corts catalanes 521. [http://www.ecbarquitectura.com/#/]

A partir de las soluciones que se llevaron a cabo para los edificios anteriores, se propondrán 3 modelos distintos del edificio con 9 plantas:

- El 1er modelo será como el edificio del Carrer Villamarí, los dos pisos recrecidos serán idénticos a los pisos anteriores.
- El 2do modelo se basará en el edificio del Carrer de les Corts Catalanes los dos últimos pisos estarán recortados solo por delante.
- El 3r modelo se basará en el edificio de la calle Sepúlveda, los dos últimos pisos estarán recortados por delante y por detrás.

Definidos los modelos del estudio, se realizaron las pertinentes simulaciones de éstos mediante el programa 3MURI.

6. El modelo

6.1. 3Muri

Para definir los modelos tipo de este estudio se ha utilizado el programa 3Muri, desarrollado en la Universidad de Génova por Penna (2002), Galasco (2006) y Lagomarsino y Cattari (2009). El software está basado en macro elementos para representar paneles de mampostería y considera el daño estructural por medio de modelos constitutivos que han sido calibrados a partir de los mecanismos de disipación observados en casos reales.

Dicho programa permite el análisis estático tridimensional no lineal de estructuras de mampostería combinadas con elementos de otros materiales como madera, hierro u hormigón armado, que forman parte de muros, vigas o columnas. El programa evalúa los principales modos de fallo en el plano de los paneles de mampostería. De esta manera, este modelo simplificado tiene en cuenta la evolución del daño controlando el deterioro de la resistencia y degradación de la rigidez.

6.2. Modelo edificio original

El Edificio original se encuentra detallado en el trabajo [R. Gonzalez-Drigo, J. Avila-Haro, L.G. Pujades and A.H. Barbat, *Non-linear static procedures applied to high-rise residential URM buildings (2016)*], por lo que en este trabajo solo se mostrará un pequeño resumen del edificio. El propósito de este estudio es hacer la comparativa de diferentes modelos de recrecido.

El primer paso es construir el edificio original en el programa de análisis estructural 3muri [Figura6.1]. Para ello se generará la planta baja y la planta tipo en AutoCAD para luego ser exportados los croquis en formato *dxf* al programa. Una vez cargados los ficheros de AutoCAD que servirán de plantilla, se procederá a dibujar las líneas base del edificio (Figura6.2).

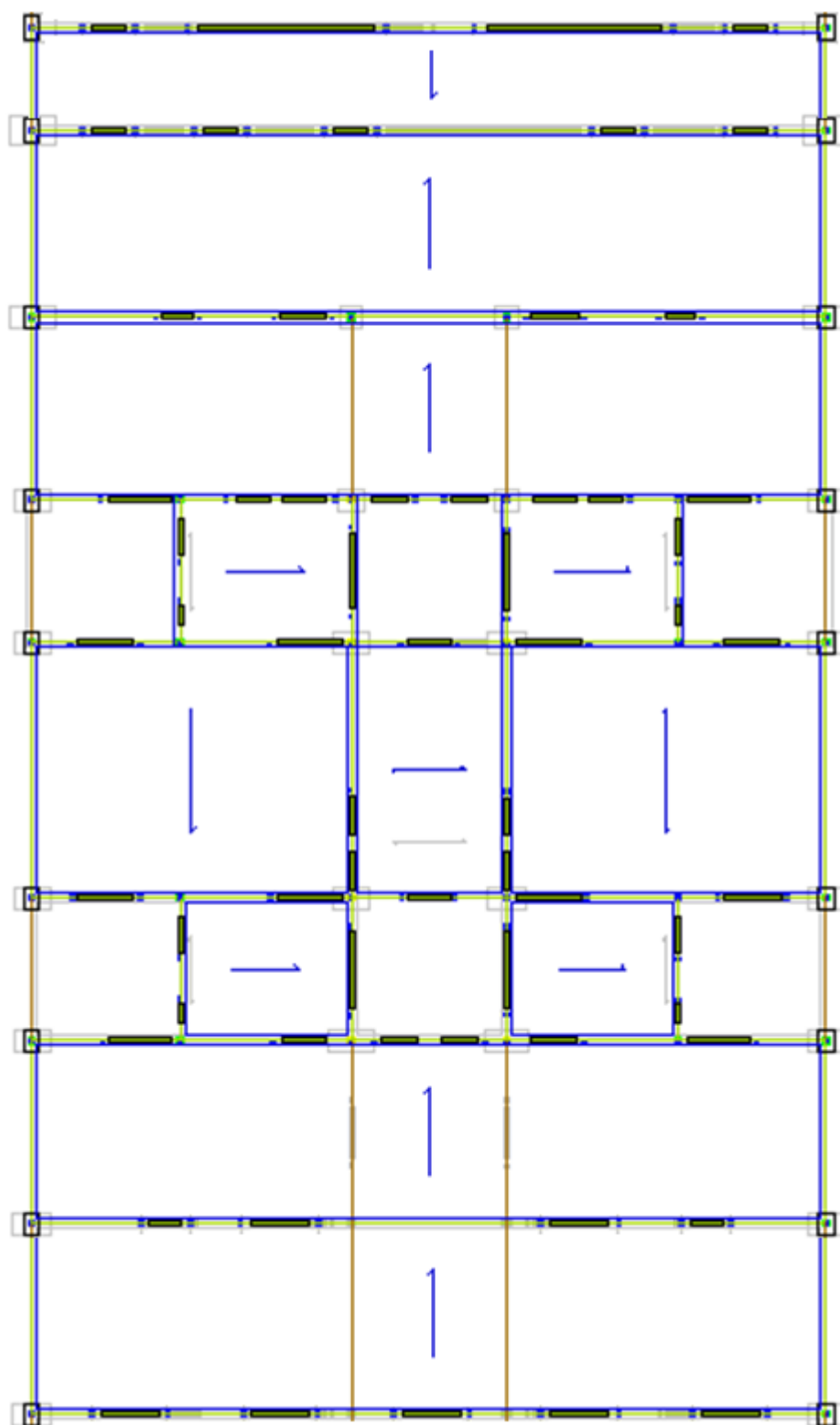


Figura6.2: Croquis de planta tipa con todos sus elementos estructurales [fuente propia]

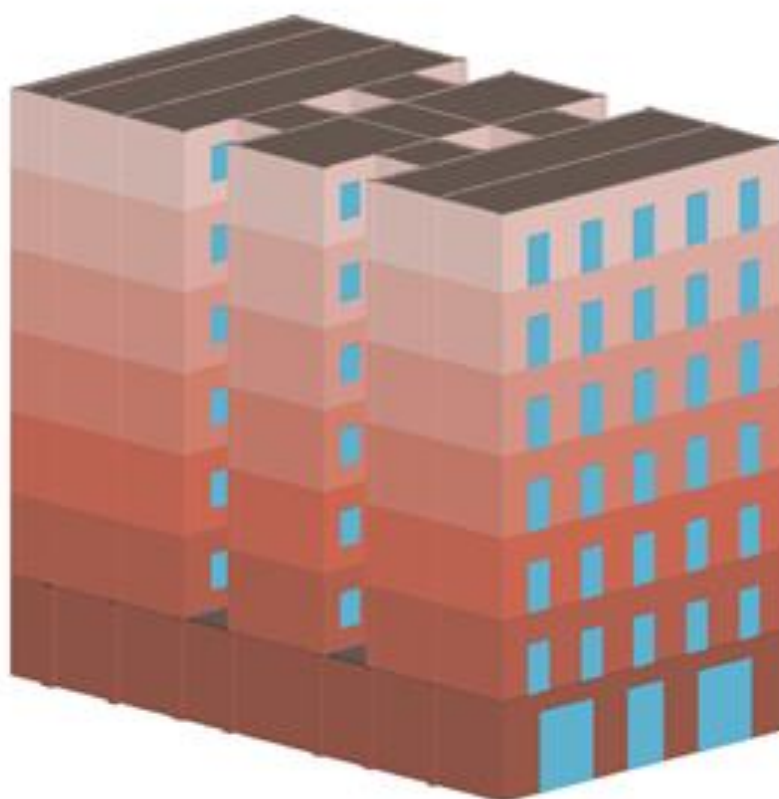


Figura6.1: 3D edificio original (elaboración propia)

6.2.1. Descripción del edificio

6.2.1.1. Columnas

6.2.1.1.1 Columnas planta baja

En la planta baja de nuestro edificio se pueden observar 8 tipos de columnas diferentes (**Figura6.3**), con sus respectivas secciones y materiales. Todas las columnas son de mampostería exceptuando 4 columnas que pertenecen al mismo tipo (C3). El edificio es simétrico por lo que las columnas pertenecientes a la medianera de la derecha coinciden con las ya especificadas en la **Figura6.3**.

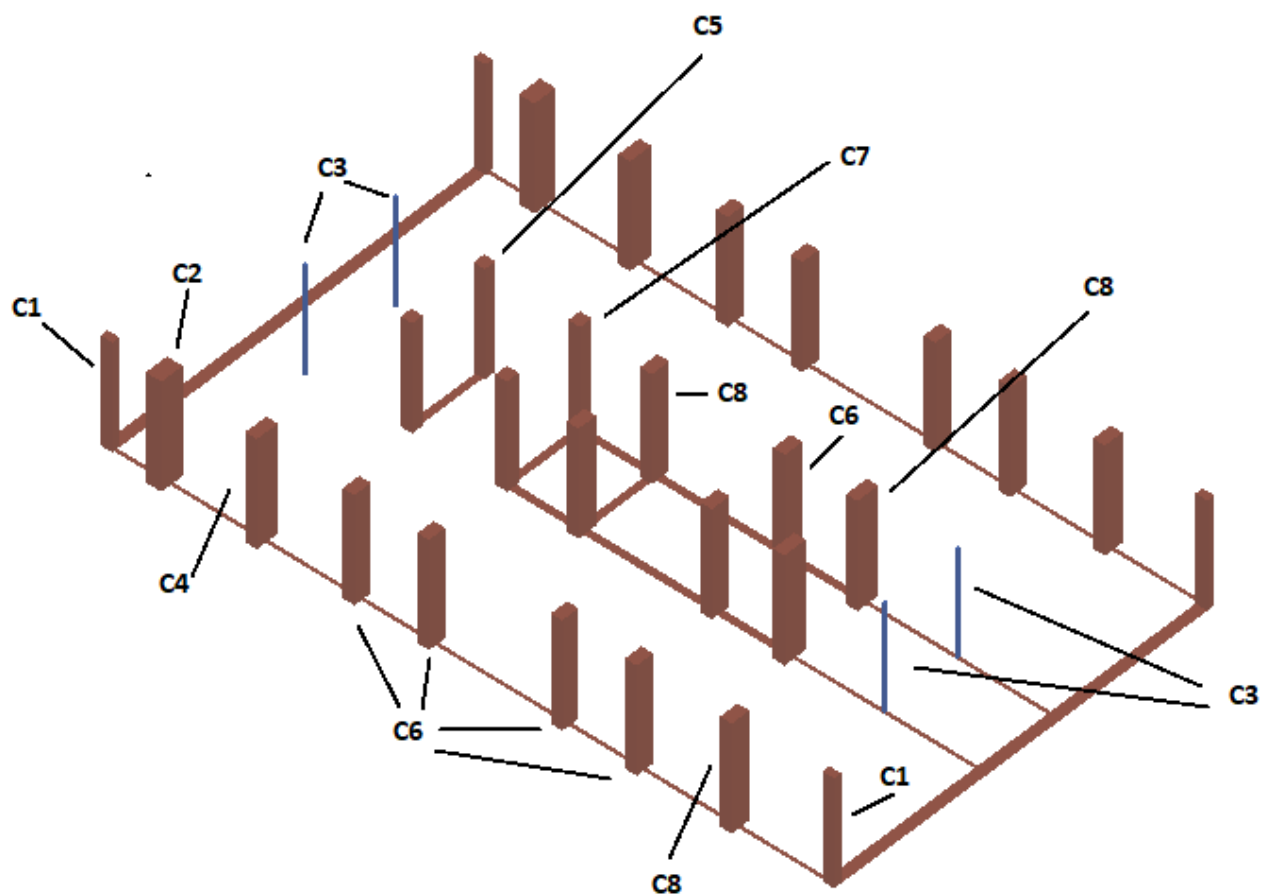


Figura6.3: Distribución de las columnas de la planta baja (elaboración propia)

A continuació se exposarà en la **Tabla6.1**, detallando los diferentes tipos de columnas que hay en dicha planta:

Tabla6.1: Detalle de propiedades de los diferentes tipos de columna

Columnas planta baja	
Simbología	Material
C1	Mampostería
C2	Mampostería
C3	Metal
C4	Mampostería
C5	Mampostería
C6	Mampostería
C7	Mampostería
C8	Mampostería

6.2.1.1.2 Columnas planta tipo

En las plantas tipo solo hay 2 tipos de columnas (**Tabla6.2**), siendo el tipo C1 el predominante. Las dos únicas columnas del tipo C2 se encuentran presentes en la fachada frontal (**Figura6.4**). Esto se debe a que el muro de la fachada frontal es de 45cm y las columnas C2 ven reducidas sus dimensiones al estar embestidas en la fachada. Todas las columnas son de mampostería siendo la sección la única diferencia entre las 2 columnas de la fachada frontal y el resto

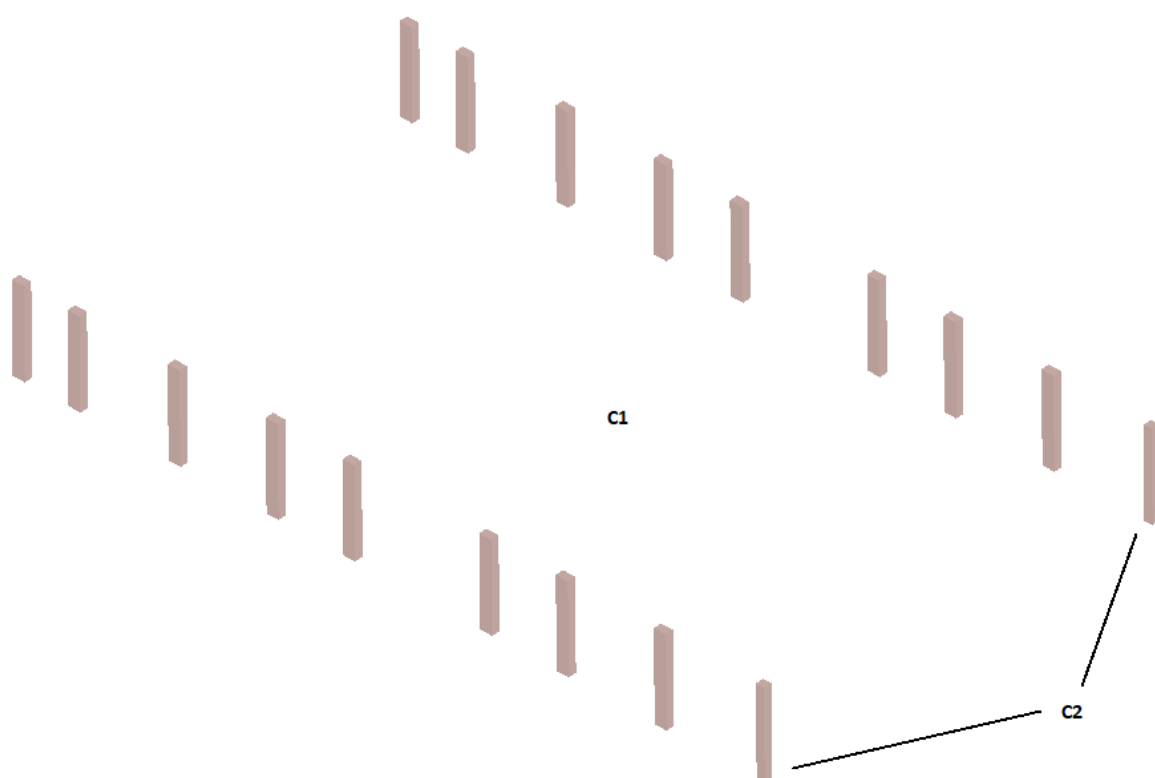


Figura6.4: Distribución de las columnas de la planta tipo

Tabla6.2: Detalle de propiedades de los diferentes tipos de columna

Columnas planta baja	
Simbología	Material
C1	Mampostería
C2	Mampostería

6.2.1.2. Muros

Los muros del edificio son todos de mampostería (**Tabla6.3**), tanto en la planta baja como en las plantas tipo, y solo muestran diferentes espesores entre ellos.

Tabla6.3: Detalle de propiedades de los diferentes tipos de columna

Muros		
Simbología	Material	Espesor (cm)
M1	Mampostería	45
M2	Mampostería	30
M3	Mampostería	15

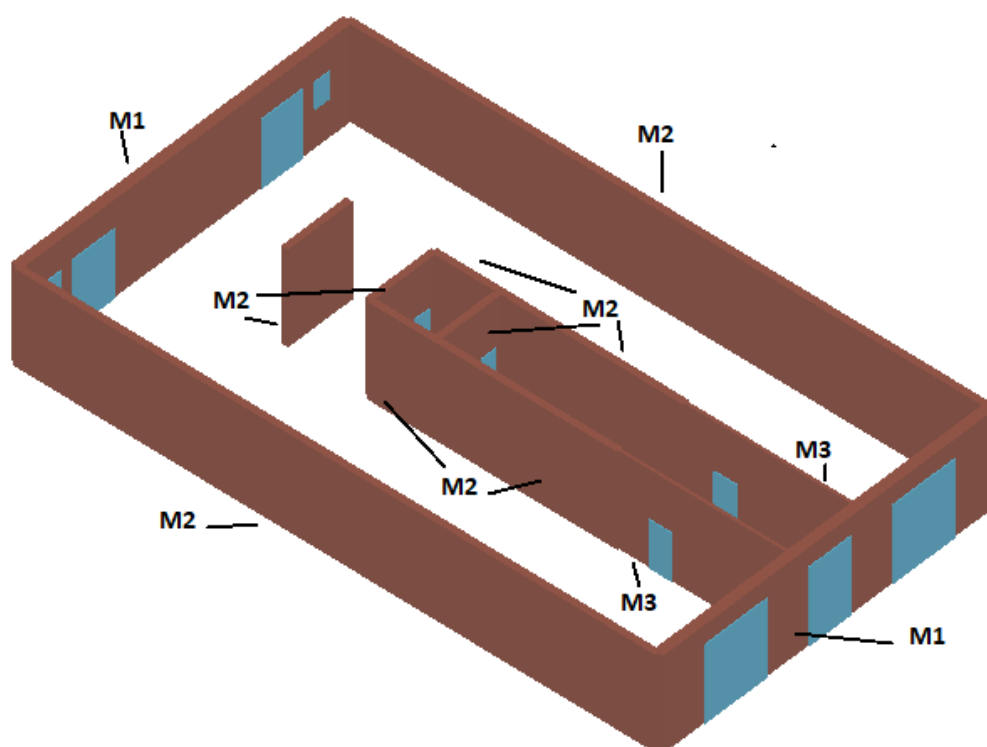


Figura6.5: Distribución de muros de la planta baja

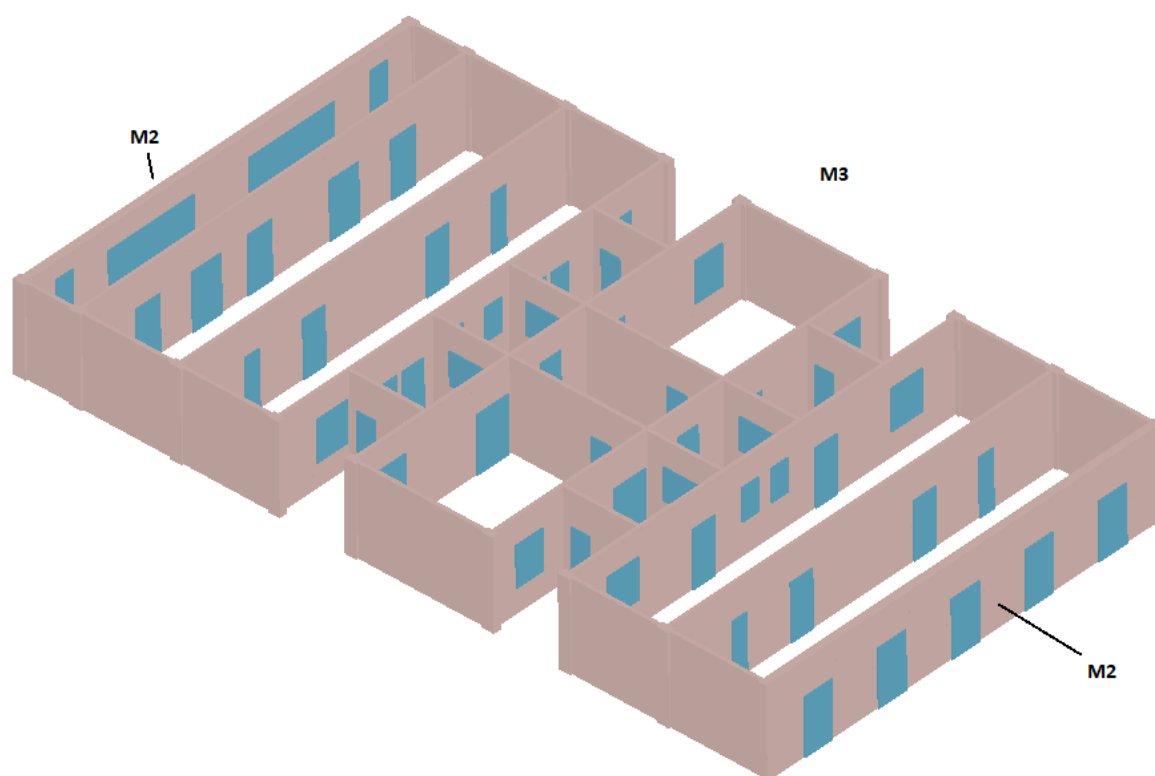


Figura6.6: Distribución de muros de la planta tipo, todos los muros son de 15cm excepto las dos fachadas de 30cm cada uno

6.2.1.3. Vigas

En lo que a vigas se refiere, la planta baja dispone de una gran variedad de vigas de metal, contabilizando un total de 13 tipos distintos (**Tabla5**). En cambio las vigas de la planta tipo solo tienen 3 variantes (**Tabla6**) y todas ellas están destinadas a repartir la fuerza del peso para proteger las aperturas de la planta.

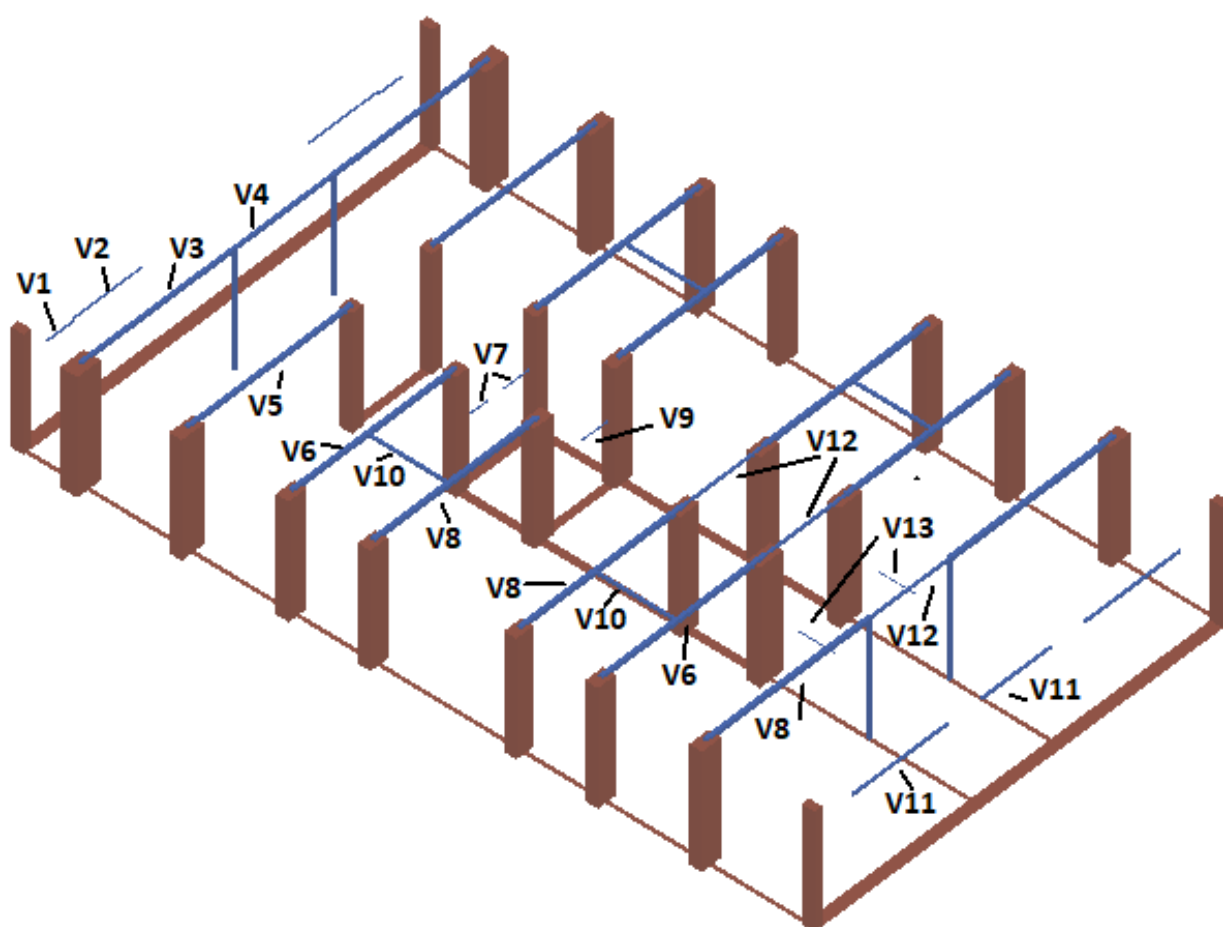


Figura6.7: Distribución de las vigas de la planta baja

Tabla6.5: Detalle de las propiedades de los distintos tipos de vigas de la planta baja

Vigas planta baja			
Simbología	Tipo	Material	Altura (cm)
V1	Apertura	Metal	305
V2	Apertura	Metal	315
V3	Forjado	Metal	420
V4	Forjado	Metal	420
V5	Forjado	Metal	420
V6	Forjado	Metal	420
V7	Apertura	Metal	225
V8	Forjado	Metal	420
V9	Apertura	Metal	225
V10	Forjado	Metal	420
V11	Apertura	Metal	350
V12	Forjado	Metal	420
V13	Apertura	Metal	225

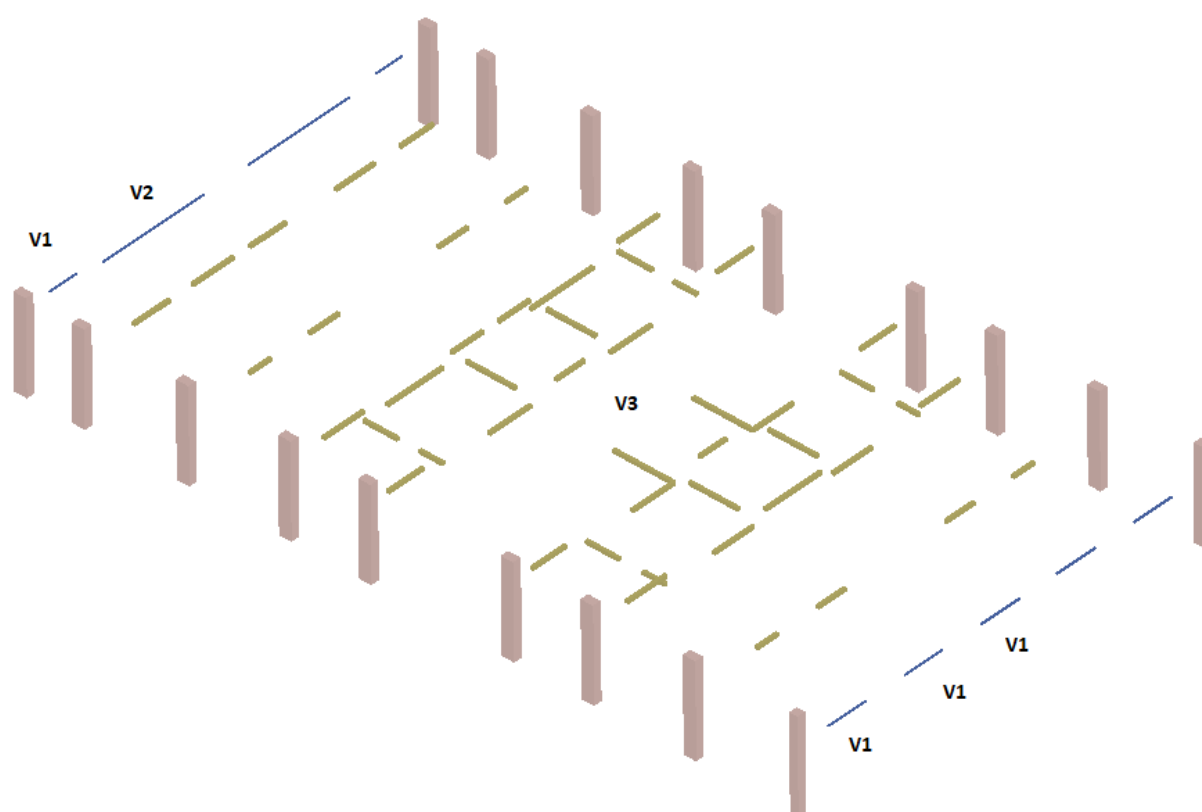


Figura6.8: Distribución de las vigas de la planta tipo

Tabla6.6: Detalle de las propiedades de los distintos tipos de vigas de la planta tipo

Vigas planta tipo			
Simbología	Tipo	Material	Altura (cm)
V1	Apertura	Metal	285
V2	Apertura	Metal	265
V3	Apertura	Metal	225

6.2.1.4. Aperturas

En este punto se mostrará la distribución de aperturas que hay en el edificio. En la planta baja, como se puede observar en la **Figura6.9**, son básicamente puertas de diferentes tamaños dependiendo de para qué uso se haya concebido. En el caso de la planta baja solo hay dos ventanas iguales en la fachada trasera que dan al patio de luces. En cambio el resto de plantas tienen una gran variedad de aperturas debido como se aprecia en la **Figura6.10**.

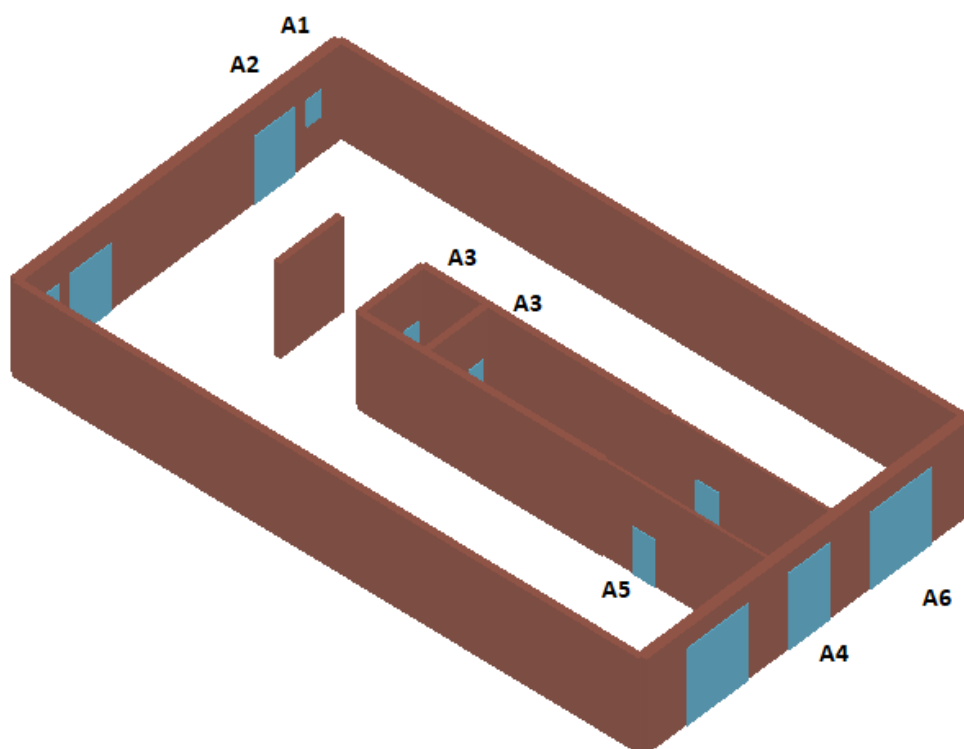


Figura6.9: Distribución de las aperturas planta baja

Tabla6.7: Detalle de las características de las aperturas de la planta baja

Aperturas planta baja				
Simbología	Tipo	Altura desde el suelo (cm)	Altura (cm)	Ancho (cm)
A1	Ventana	170	120	70
A2	Puerta	-	300	200
A3	Puerta	-	210	70
A4	Puerta	-	340	200
A5	Puerta	-	210	100
A6	Puerta	-	340	300

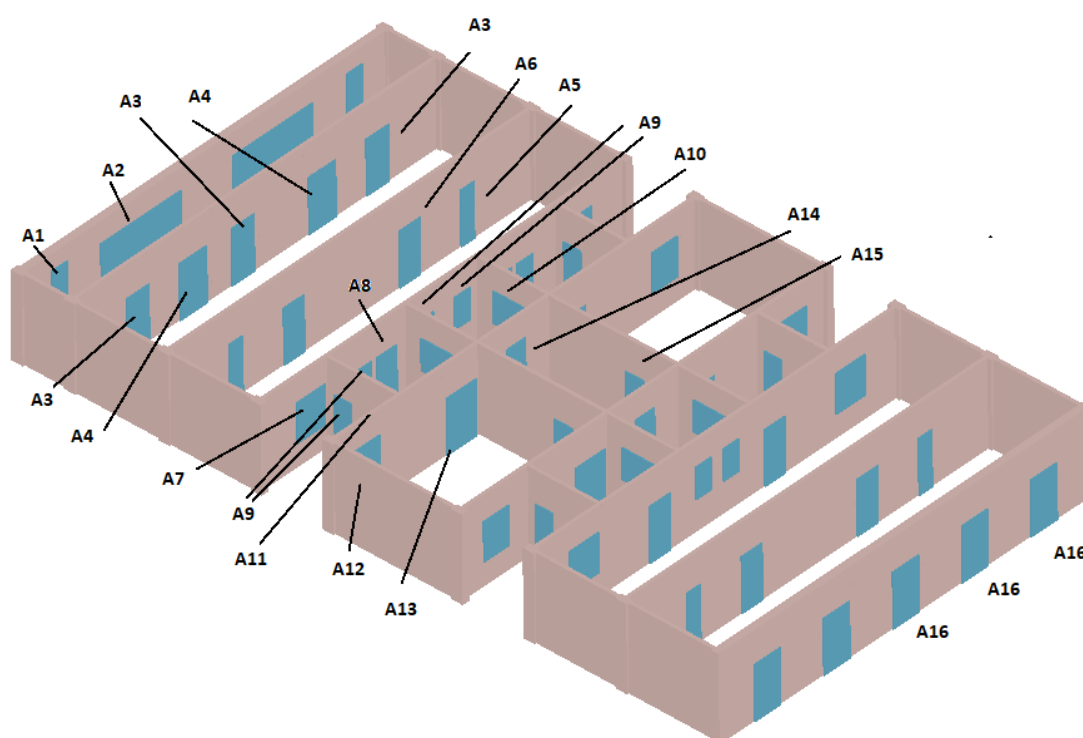


Figura6.10: Distribución de las aperturas planta tipo

Tabla6.8: Detalle de las características de las aperturas de la planta tipo

Aperturas planta tipo				
Simbología	Tipo	Altura desde el suelo (cm)	Altura (cm)	Ancho (cm)
A1	Ventana	120	150	70
A2	Puerta	-	250	350
A3	Puerta	-	210	100
A4	Puerta	-	210	120
A5	Puerta	-	210	60
A6	Puerta	-	210	92
A7	Ventana	90	150	127
A8	Puerta	-	210	90
A9	Puerta	-	210	70
A10	Ventana	120	120	150
A11	Ventana	120	90	35
A12	Ventana	90	150	112
A13	Puerta	-	210	130
A14	Ventana	120	120	85
A15	Puerta	-	210	77
A16	puerta	-	210	115

6.3. Modelo recrecido 1

En la primera solución de recrecido propuesta, los dos pisos que se añaden tendrán la misma distribución y características que las plantas tipo del edificio original. (**Figura6.11**)

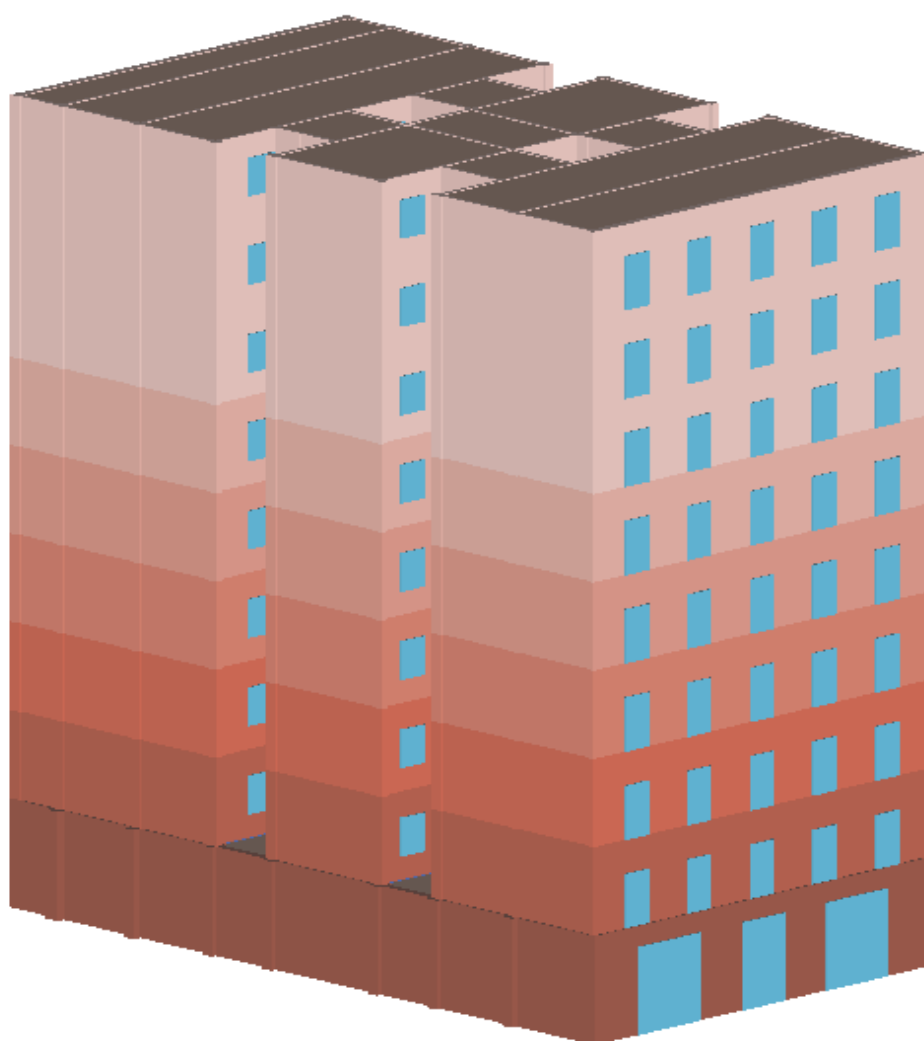


Figura6.11: 3D del modelo 1 (fuente propia)

6.4. Modelo recrecido 2

En el segundo modelo estudiado, se opta por recortar la planta tipo original por delante y por detrás (**Figura6.12**). Con esta nueva distribución, se tiene que modificar el espesor de dos muros interiores que ahora pasan a ser fachadas. Además se tiene que modificar la disposición de las aperturas en las nuevas fachadas, como la inclusión de las ventanas exteriores. La siguiente imagen (**Figura6.13**) muestra el croquis de la planta tipo modificado para los dos últimos niveles.

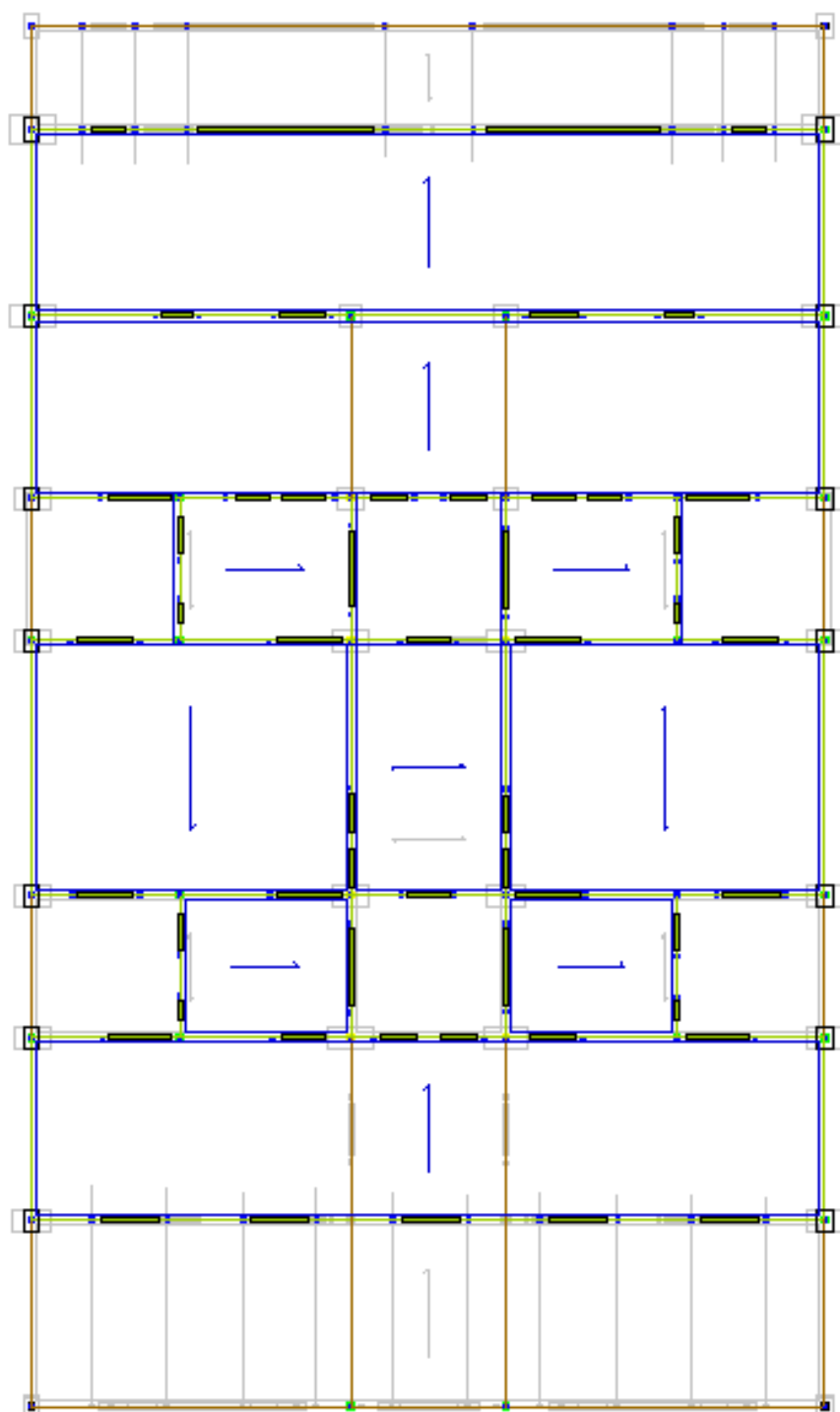


Figura6.13: Croquis niveles 8 y 9 del modelo 2 [fuente propia]

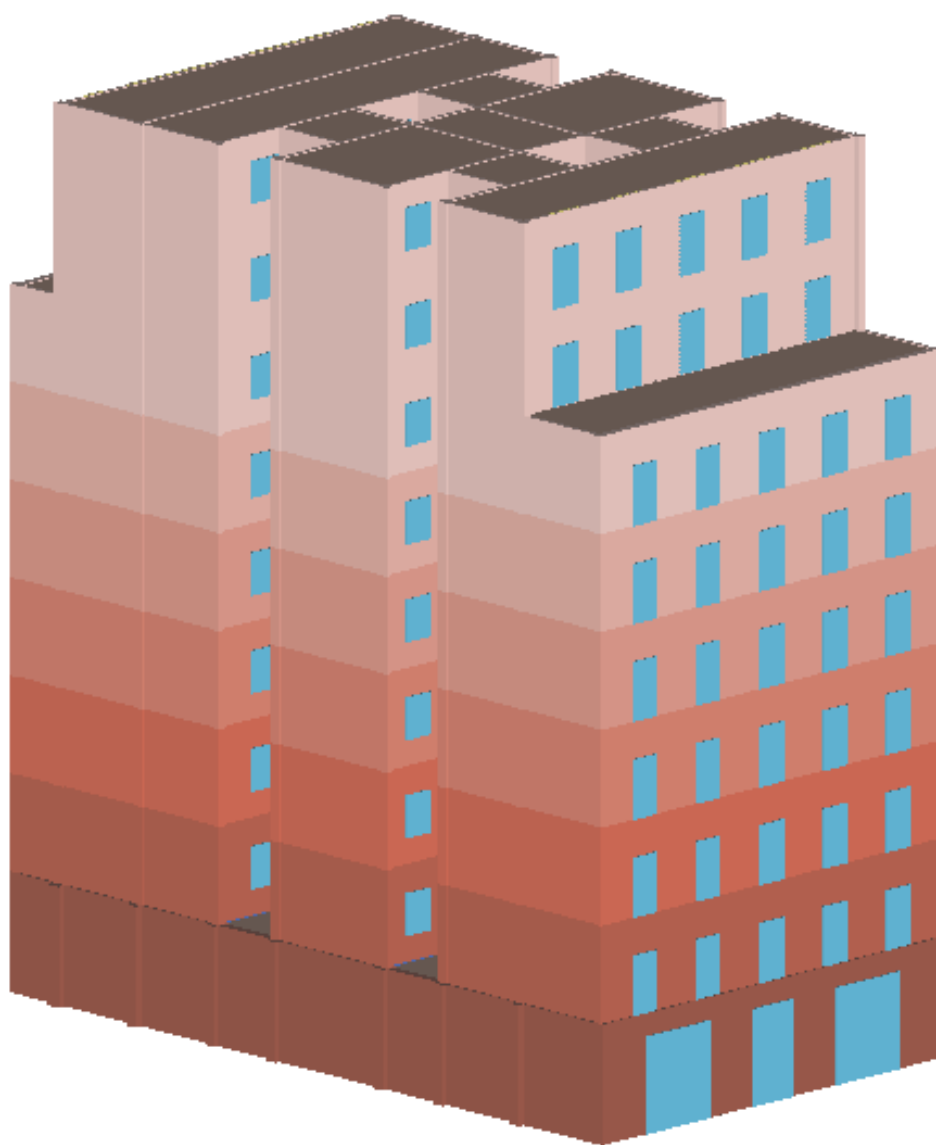


Figura6.12: 3D modelo 2 (elaboración propia)

6.5. Modelo recrecido 3

En el tercer modelo que se presenta en el trabajo, se ha decidido que los niveles 8 y 9 del recrecido también sean diferentes a la planta tipo del modelo original. En este caso se presenta un croquis (**figura6.14**) en el que solo se recorta la parte de delante, por lo que la fachada trasera permanecerá igual que en el edificio original y el modelo 1. En cambio la fachada delantera tendrá las mismas modificaciones que el modelo 2, de tal manera que el muro interior siguiente pasará a ser fachada frontal y se le añadirán las mismas aperturas (ventanas exteriores) (**figura6.15**).

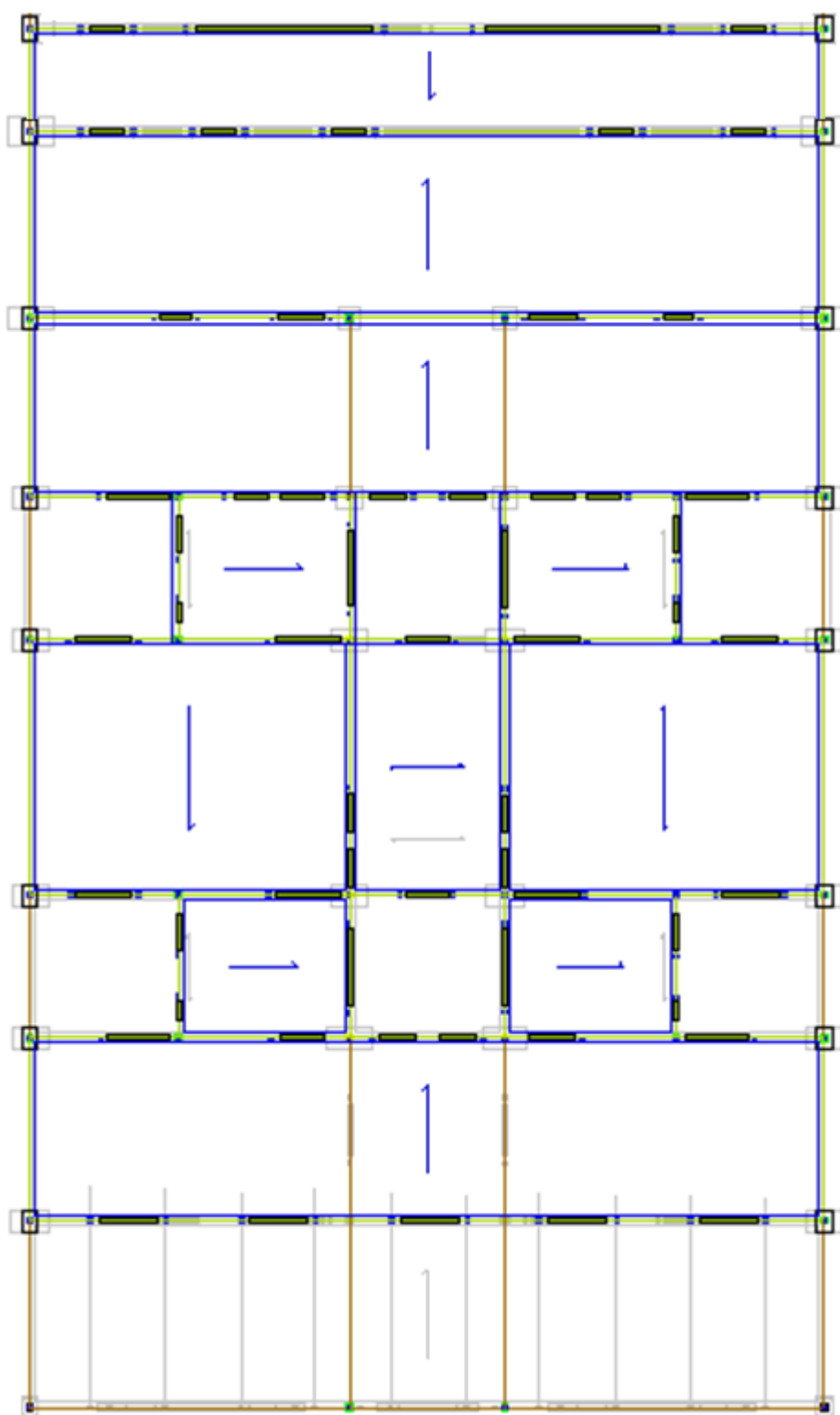


Figura6.14: Croquis niveles 8 y 9 del modelo 3 [fuente propia]

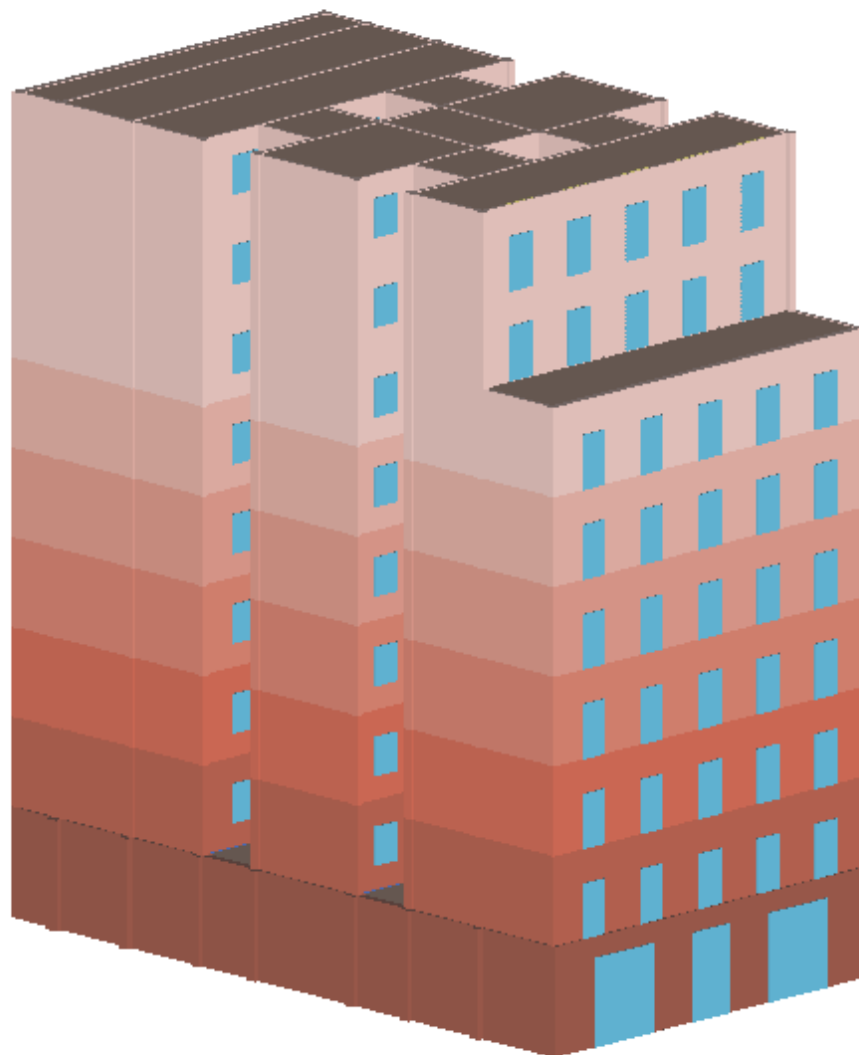


Figura6.15: 3D modelo 3 (elaboración propia)

7. Demanda

La ciudad de Barcelona se encuentra en una región de riesgo sísmico bajo-moderado. La intensidad macro sísmica con un período de retorno de 475 años se sitúa entre los grados VI y VII de la escala macro sísmica europea EMS'98 (Tabla7.1).

Tabla7.1: Valores de intensidad sísmica [EMS'98]

Grado	Descripción	Grado	Descripción
I. No sentido	No se siente, ni en las circunstancias más favorables.	VII. Dañino	La mayoría de las personas se asustan y escapan al exterior. Los muebles se desplazan y los objetos caen de las estanterías en cantidad. Muchos edificios corrientes sufren daños moderados: pequeñas grietas en las paredes, derrumbe parcial de chimeneas.
II. Apenas sentido	La vibración se percibe solo por algunas personas (1%) especialmente personas en reposo en los pisos superiores de los edificios.	VIII. Gravemente dañino	Pueden volcarse los muebles. Muchos edificios corrientes sufren daños: las chimeneas se derrumban; aparecen grandes grietas en las paredes y algunos edificios pueden derrumbarse parcialmente.
III. Débil	La vibración es débil y se percibe en interiores sólo por unas pocas personas. Las personas en reposo sienten un balanceo o ligero temblor.	IX. Destructor	Monumentos y columnas caen o se tuercen. Muchos edificios corrientes se derrumban parcialmente, unos pocos se derrumban completamente.
IV. Ampliamente observado	El terremoto se percibe en interiores por muchas personas, pero al aire libre por muy pocas. Algunas personas se despiertan. El nivel de vibración no es alarmante. Traqueteo de ventanas, puertas y platos. Los objetos colgados se balancean.	X. Muy destructor	Muchos edificios corrientes se derrumban.
V. Fuerte	El terremoto se percibe en interiores por la mayoría, al aire libre por unos pocos. Muchas personas que dormían se despiertan. Algunos escapan de los edificios, que tiemblan en su totalidad. Los objetos colgados se balancean considerablemente. Los objetos de porcelana y cristal entorchocan. La vibración es fuerte. Los objetos altos se vuelcan. Puertas y ventanas se abren y cierran solas.	XI. Devastador	La mayoría de los edificios corrientes se derrumban.
VI. Levemente dañino	Sentido por la mayoría en los interiores y por muchos en el exterior. En los edificios muchas personas se asustan y escapan. Los objetos pequeños caen. Daño ligero en los edificios corrientes, por ejemplo, aparecen grietas en el enlucido y caen trozos.	XII. Completamente devastador	Prácticamente todas las estructuras por encima y por debajo del suelo quedan gravemente dañadas o destruidas

Existen diversos documentos y normativas que regulan las acciones sísmicas que han de considerarse para este tipo de estudios, dentro de los cuales podemos mencionar en particular para Barcelona: la Normativa Sísmica Española (NCSE-02), el Euro Código 8, y los estudios de microzonación realizados para la ciudad y cuyos resultados fueron expuestos por Irizarry (2004). Los documentos anteriores proponen distintas formulaciones para la obtención de los

espectros de diseño a utilizarse en la definición de la demanda sísmica, así los valores y constantes a utilizar relacionados con la aceleración del terreno.

A continuación se muestran las características de cada uno de estos documentos, los espectros resultantes y una comparativa entre ellos, de acuerdo al tipo de terreno en el que se encuentra el edificio de interés de este estudio, el cual corresponde al distrito de L'Eixample en Barcelona:

7.1. Normativa Sísmica Española (NCSE-02)

La NCSE-02 es la actual normativa sísmica en España, la cual sustituyó a la antigua NCSE-94. Para el cálculo de la demanda para esta normativa se requiere calcular el PGA (peak ground acceleration en inglés). Esta aceleración se obtiene mediante:

$$a_c = S \rho a_b$$

Donde:

- a_b es la aceleración básica definida para cada zona en el mapa de peligrosidad sísmica (**Figura 7.1**)

- ρ es el factor de riesgo, será 1 en el caso de un edificio normal (nuestro edificio)

- S es el coeficiente de ampliación que depende del tipo de suelo y el valor del producto entre el factor de riesgo y la aceleración básica. Para obtener C véase la **Tabla 7.2**.

$$S = \begin{cases} \frac{C}{1,25} & \rho a_b \leq 0,01g \\ \frac{C}{1,25} + 3,33 \left(\rho \frac{a_b}{g} - 0,1 \right) \left(1 - \frac{C}{1,25} \right) & 0,01g < \rho a_b < 0,04g \\ 1,0 & 0,04g \leq \rho a_b \end{cases}$$

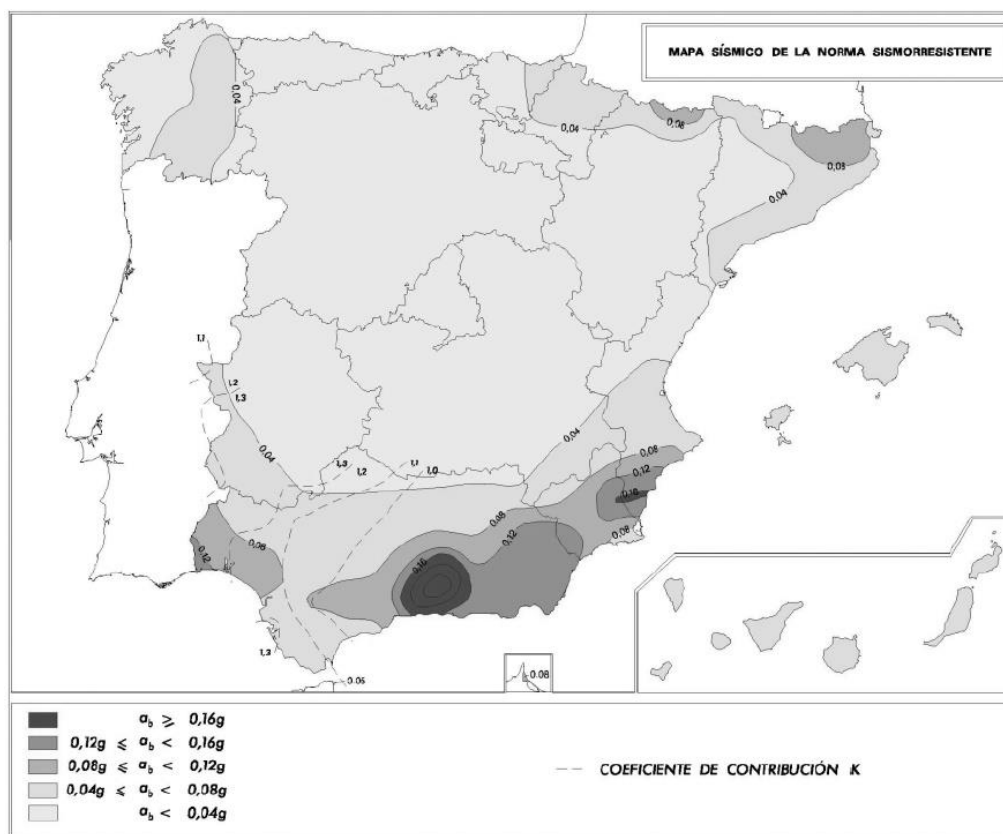


Figura7.1: Mapa de peligrosidad sísmica [NCSE-02]

El coeficiente C vendrá dado según el tipo de terreno. En el caso de Barcelona el terreno es de tipo II, por lo que el coeficiente $C = 1,3$ [Tabla7.2].

Categoría	Descripción	C
Tipo I	Roca compacta, suelo cementado o granular muy denso	1,0
Tipo II	Roca muy fracturada, suelos granulares densos o cohesivos duros	1,3
Tipo III	Suelo granular de compacidad media, o suelo cohesivo de consistencia firme a muy firme	1,6
Tipo IV	Suelo granular suelto, o suelo cohesivo blando	2,0

Tabla7.2: Coeficiente de terreno C [NCSE-02].

Para el caso, el producto entre el factor de riesgo y la aceleración básica se obtiene:

$$\rho \cdot a_b = 0.04g$$

Por lo que la S tomará el valor de 1, por lo que finalmente:

$$a_c = S \rho a_b = 1 \cdot 1 \cdot 0.04g = 0.04g$$

El valor de PGA según la normativa NSCE-02 será de 0,04g.

7.2. Irizarry

En el año 1998 se realizó un análisis detallado de la zonificación sísmica de los suelos propios de la ciudad de Barcelona, distinguiéndolos en 4 tipos.

- La zona R: suelos de buena calidad incluyendo afloramientos rocosos.
- La zona I: suelos muy suaves e incluye las áreas cercanas al muelle así como los deltas de los ríos Besós, noreste y Llobregat, al suroeste.
- Las zonas II y III: corresponden a suelos de calidad intermedia, situados respectivamente cerca del tipo de suelo I y del tipo de suelo R.

En la **Figura 7.2** se puede observar como el distrito de l'Eixample está prácticamente en su totalidad situado en suelo de tipo II.

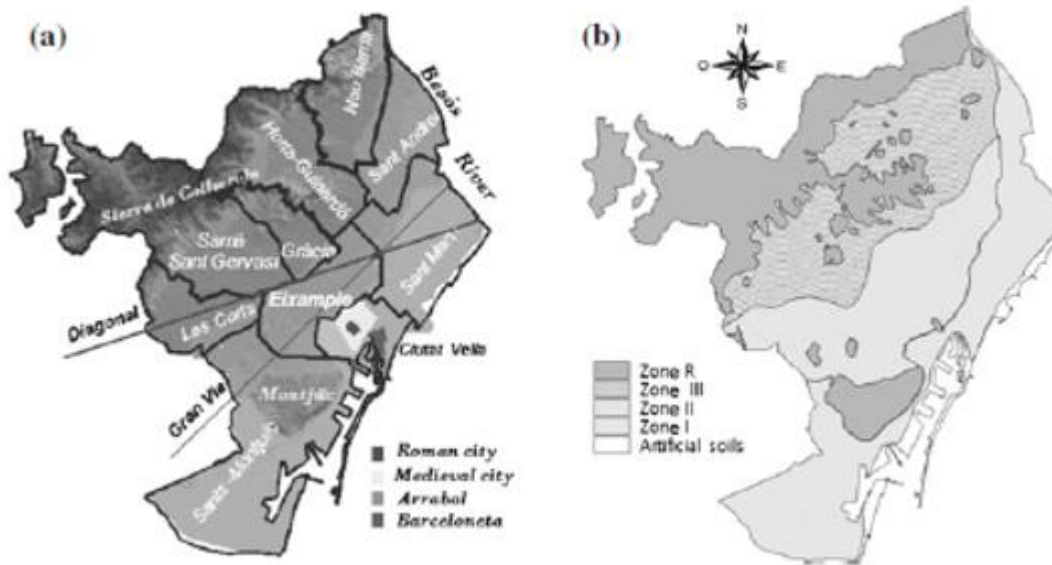


Figura 7.2: **a** Mapa de la ciudad con sus respectivos distritos. **b** zonas sísmicas de Barcelona (referencia)

En el año 2004 Irizarry desarrolló dos escenarios específicos para la ciudad de Barcelona a partir de los estudios sísmicos de micro zonas de los suelos que propuso Cid (1998) y Cid et al. (2001). El primer escenario, denominado determinista, se basa en la combinación de dos terremotos históricos:

- El de 1448 ocurrido en Cardedeu, el cual fue el de mayor intensidad epicentral de IX (MSK), afectando también a la ciudad de Barcelona
- El de 1428 en la provincia de Girona.

El espectro del segundo escenario, llamado probabilista proviene de un estudio mediante el uso del programa CRISIS 99 [Ordaz et al., 1999]. El modelo adoptado viene definido por la siguiente expresión:

$$\begin{aligned}
 0 < T \leq T_B : \quad S_e(T) &= a_0 \cdot \left[1 + \frac{T}{T_B} (s_B - 1) \right] \\
 T_B \leq T \leq T_C : \quad S_e(T) &= a_0 \cdot s_B \\
 T_C \leq T \leq T_D : \quad S_e(T) &= a_0 \cdot s_B \cdot \left[\frac{T_C}{T} \right] \\
 T_D \leq T \leq 4s : \quad S_e(T) &= a_0 \cdot s_B \cdot \left[\frac{T_C T_D}{T^2} \right]
 \end{aligned}$$

Donde:

- $Se(T)$ es el espectro de respuesta elástica
- T es el periodo de un sistema de un grado de libertad
- a_o es la aceleración de diseño según el tipo de suelo
- S_B es el factor de suelo
- T_B es el límite inferior del periodo de la rama de aceleración espectral constante, depende del tipo de suelo
- T_c es el límite superior del periodo de la rama de aceleración espectral constante, depende del tipo de suelo
- T_D es el valor que define el inicio del rango del espectro en el que el desplazamiento espectral es constante, depende del tipo de suelo

En las tablas **Tabla7.3** y **Tabla7.4** se muestran los parámetros ajustados según el modelo presentado por Irizarry para sus dos escenarios y los 4 tipos de suelos identificados en la ciudad.

Tabla7.3: Parámetros de los espectros de respuesta correspondientes a un escenario Determinista para la ciudad de Barcelona

Tipo de Suelo	Escenario determinista				
	$a_o(\text{cm/s}^2)$	S_B	$T_B(\text{s})$	$T_c(\text{s})$	$T_D(\text{s})$
R	71.1	2.26	0.10	0.23	1.50
I	133.3	1.91	0.10	0.39	0.72
II	137.7	2.45	0.10	0.22	0.85
III	120	2.29	0.10	0.22	0.85

Tabla 7.4: Parámetros de los espectros de respuesta correspondientes a un escenario Probabilista para la ciudad de Barcelona

Tipo de Suelo	Escenario Probabilista				
	a_o (cm/s^2)	S_B	$T_B(\text{s})$	T_c (s)	T_D (s)
R	98.1	2.29	0.10	0.25	1.76
I	183.9	2.00	0.10	0.40	0.90
II	190.1	2.50	0.10	0.23	1.36
III	1.65	2.57	0.10	0.19	1.56

8. Resultados

8.1. Curvas de capacidad

En este apartado se explicarán los resultados obtenidos por el análisis pushover de nuestros 3 modelos. Cada uno de los modelos obtiene 2 curvas pushover, una curva para la dirección +X (**Figura8.1, Figura8.5, Figura8.9, para los modelos 1-3 respectivamente**), y la otra para la dirección +Y (**Figura8.4, Figura8.8, Figura8.10 para los modelos 1-3 respectivamente**).

8.1.1. Modelo 1

Otro de los datos que nos proporciona el análisis pushover de 3muri es la evaluación de daños del edificio en la dirección que queremos estudiar a medida vamos recorriendo los distintivos tramos de la curva.

En el caso de la dirección +X, en la **Figura8.1** se puede observar como el edificio está en el límite de su estado elástico y ningún componente ha sido afectado. En cambio vemos como al avanzar por la curva llegamos a la situación que se muestra en la **Figura8.2**, donde algunas zonas empiezan a romper, hasta que finalmente llegamos al tramo final de la curva en la que la mayor parte de la estructura ha sido gravemente afectada (**Figura8.3**).

La **Figura8.4** nos muestra la curva pushover del modelo 2 para la dirección +Y.



EC8:ULS check not satisfied - DLS check satisfied

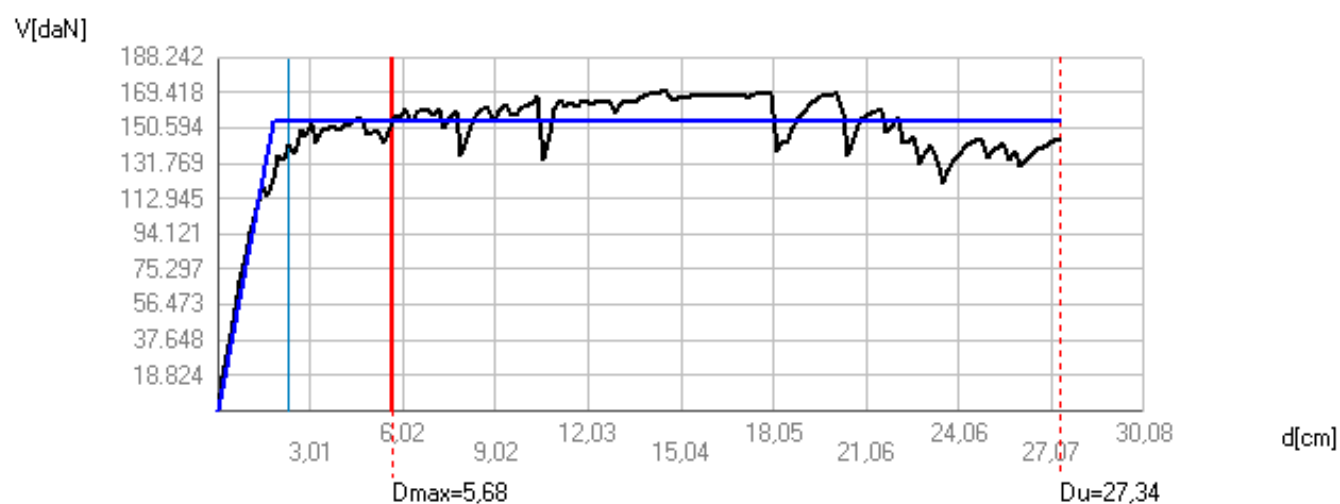


Figura8.1: Daños en los Elementos de fachada en el tramo elástico (arriba); Curva Pushover +X (abajo)

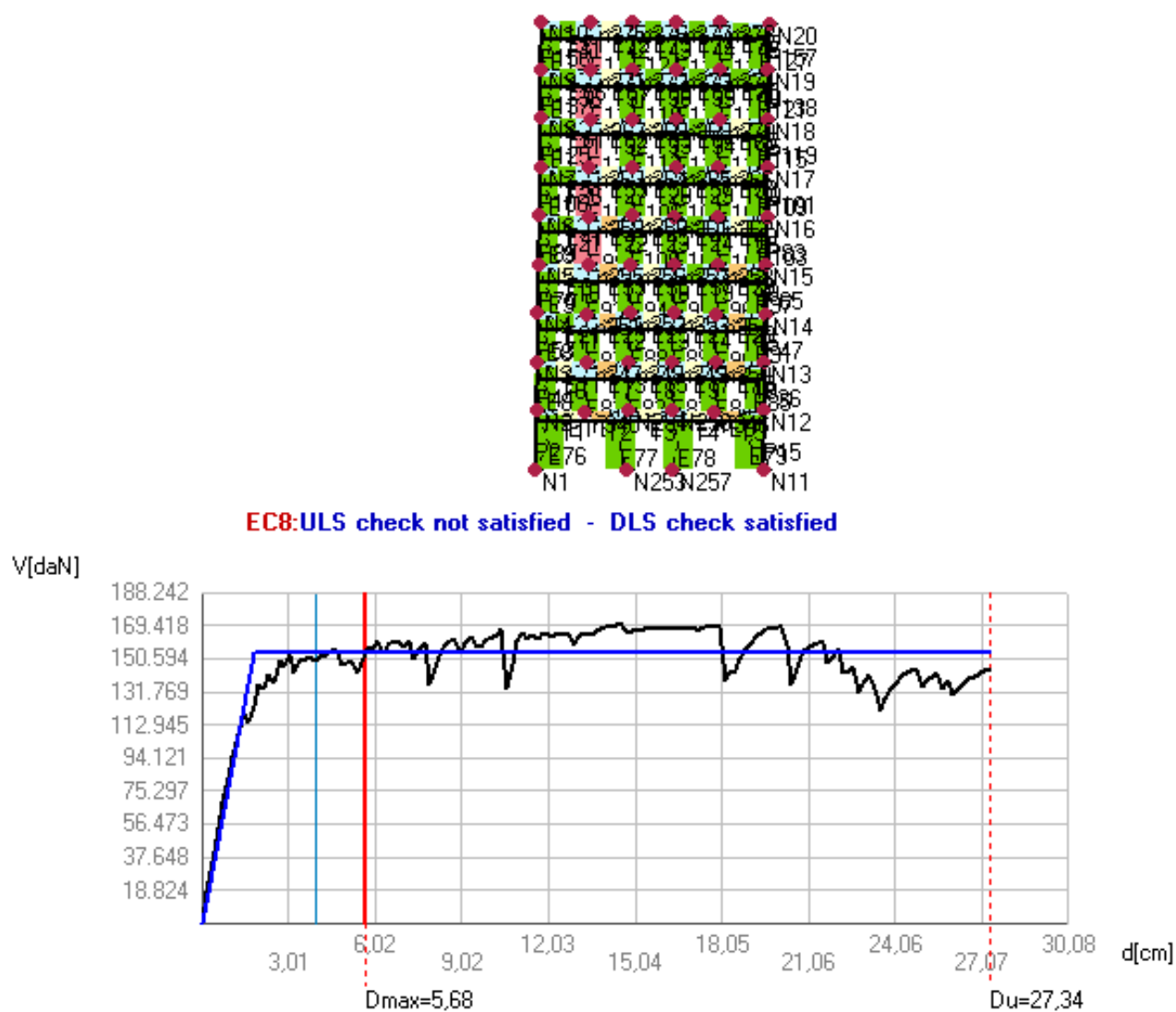
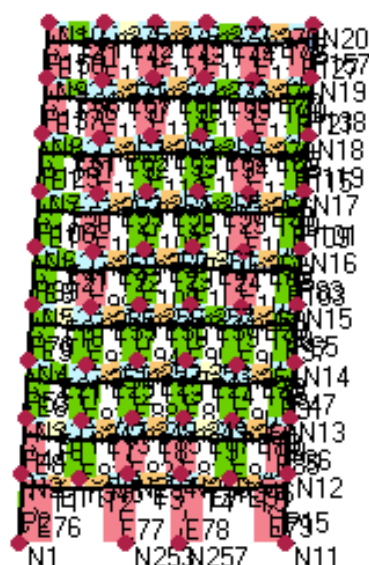


Figura8.2: Daños en los Elementos de fachada en el tramo de fluencia (arriba); Curva Pushover +X (abajo)



EC8:ULS check not satisfied - DLS check satisfied

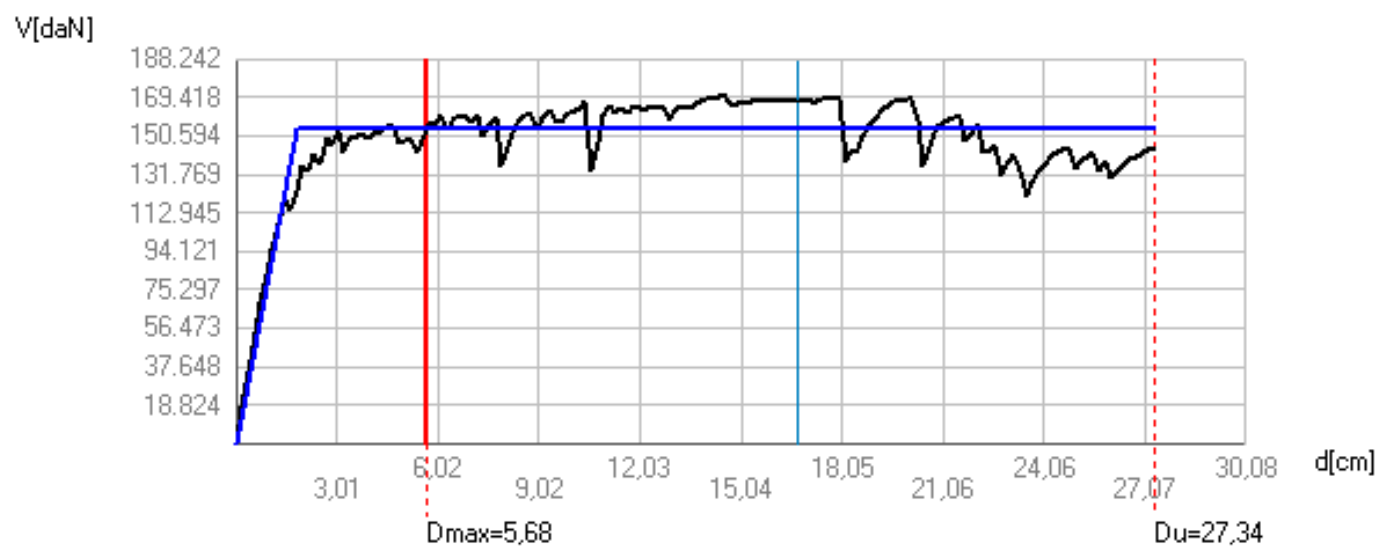


Figura8.3: Daños en los Elementos de fachada en el tramo final (arriba); Curva Pushover +X (abajo)

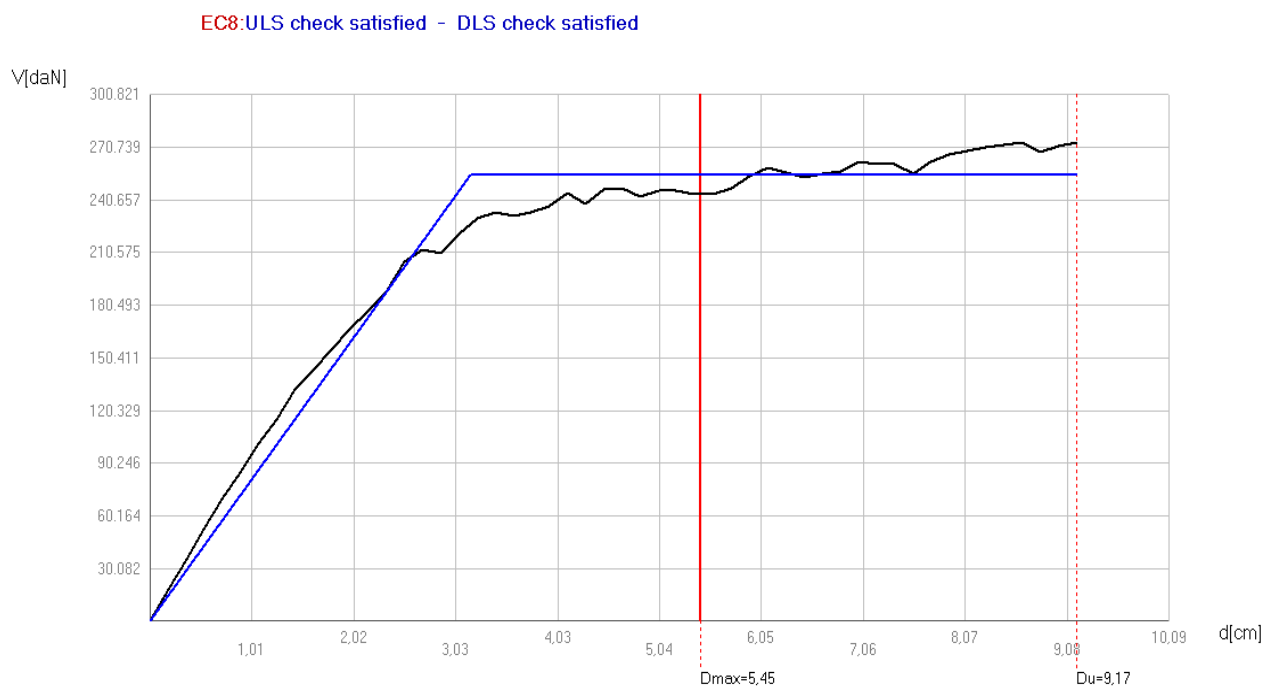


Figura8.4: Curva Pushover +Y

8.1.2. Modelo 2

Para el caso de la dirección +X del modelo 2, la **Figura8.5** muestra la iteración previa al primer estado de daños de la estructura, estando en un tramo elástico. En la **Figura8.6** se puede observar un deterioro importante en el tramo de fluencia y por último, como en el ejemplo del primer modelo vemos que la 3era imagen (**Figura8.7**) se encuentra en un estado muy avanzado en la que el edificio presenta graves daños estructurales.

La **Figura8.8** nos muestra la curva pushover del modelo 2 para la dirección +Y.

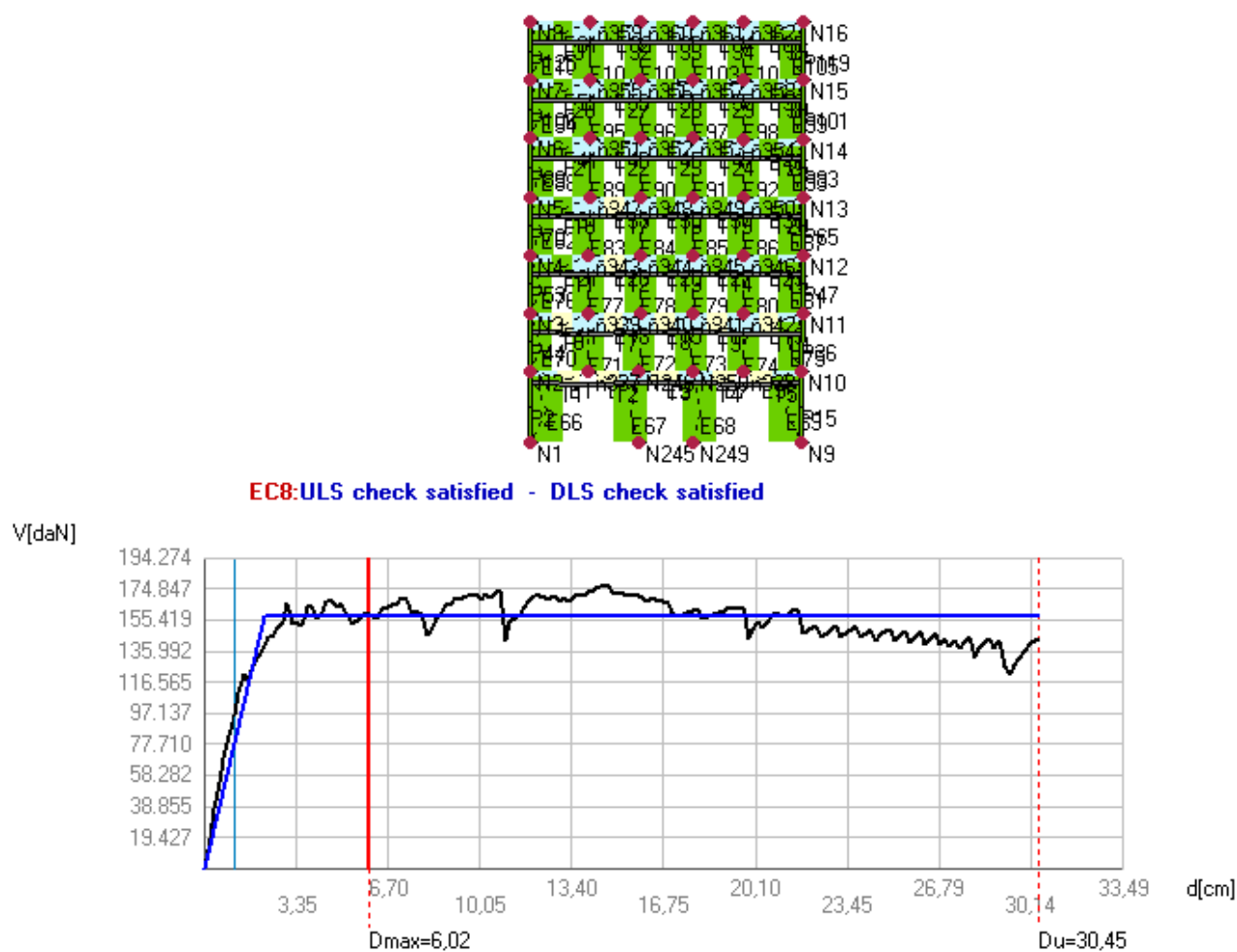


Figura8.5: Daños en los Elementos de fachada en el tramo elástico (arriba); Curva Pushover +X (abajo)

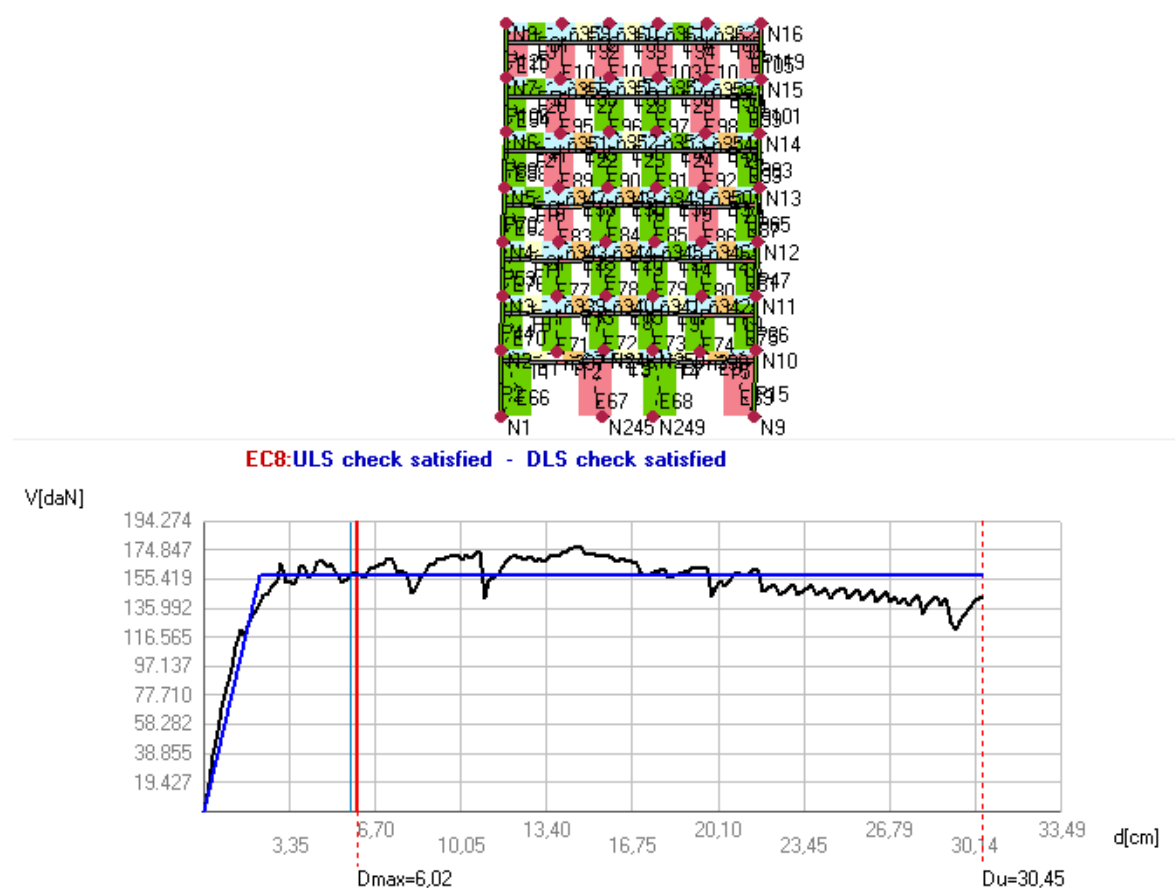


Figura8.6: Daños en los Elementos de fachada en el tramo de fluencia (arriba); Curva Pushover +X (abajo)

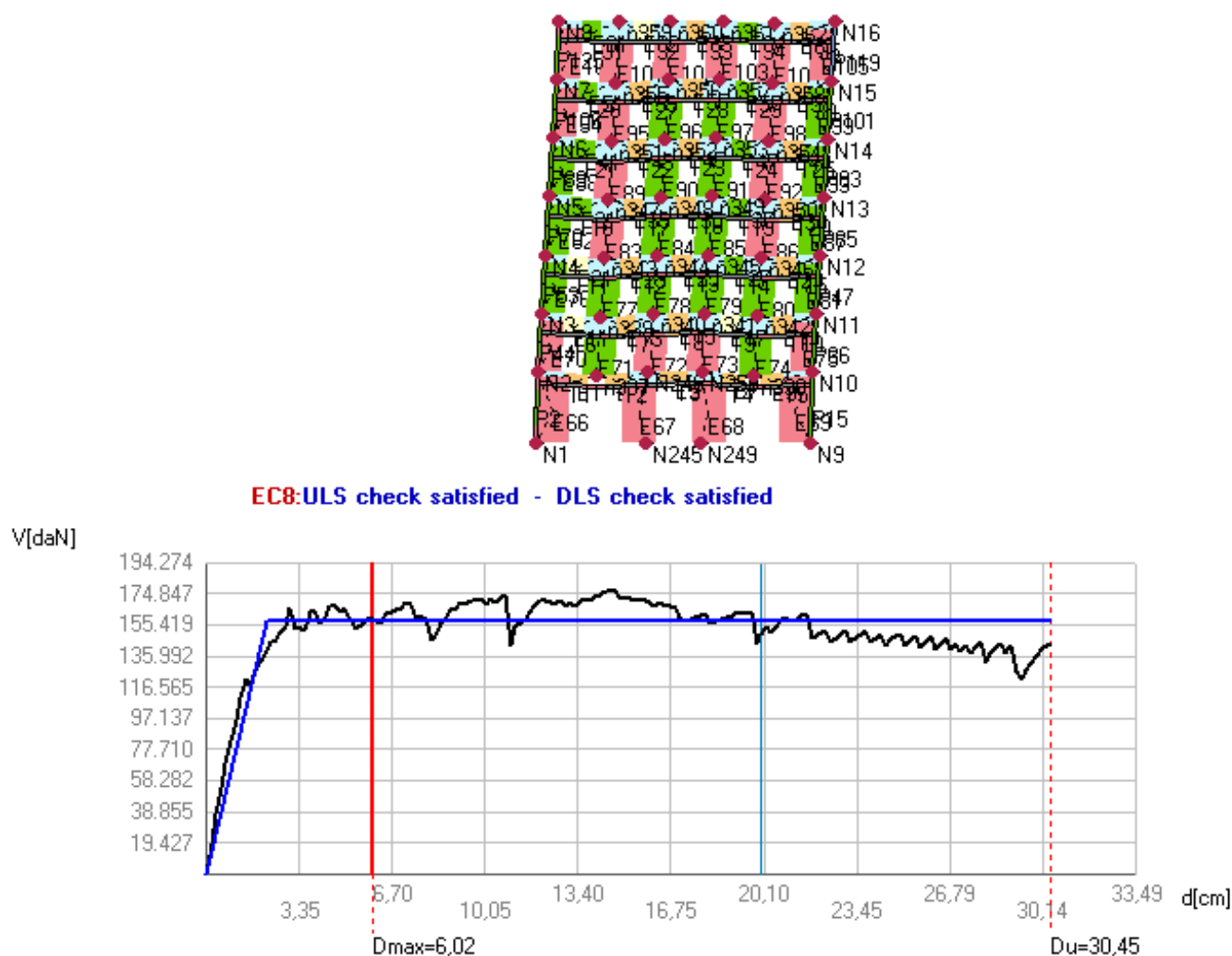


Figura8.7: Daños en los Elementos de fachada en el tramo final (arriba); Curva Pushover +X (abajo)

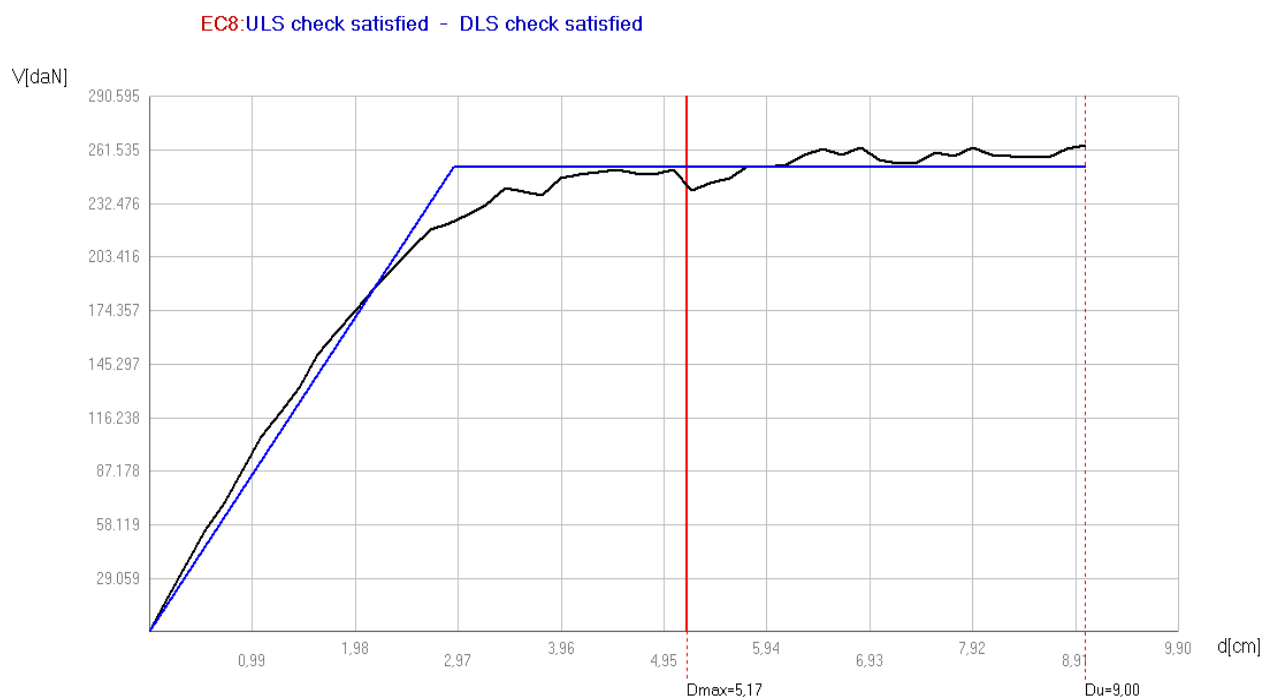


Figura8.8: Curva Pushover +Y

8.1.3. Modelo 3

El tercer modelo propuesto tiene como resultado del análisis pushover las 2 siguientes curvas (**Figura8.9**) y (**Figura 8.10**) para las direcciones +X y +Y respectivamente.

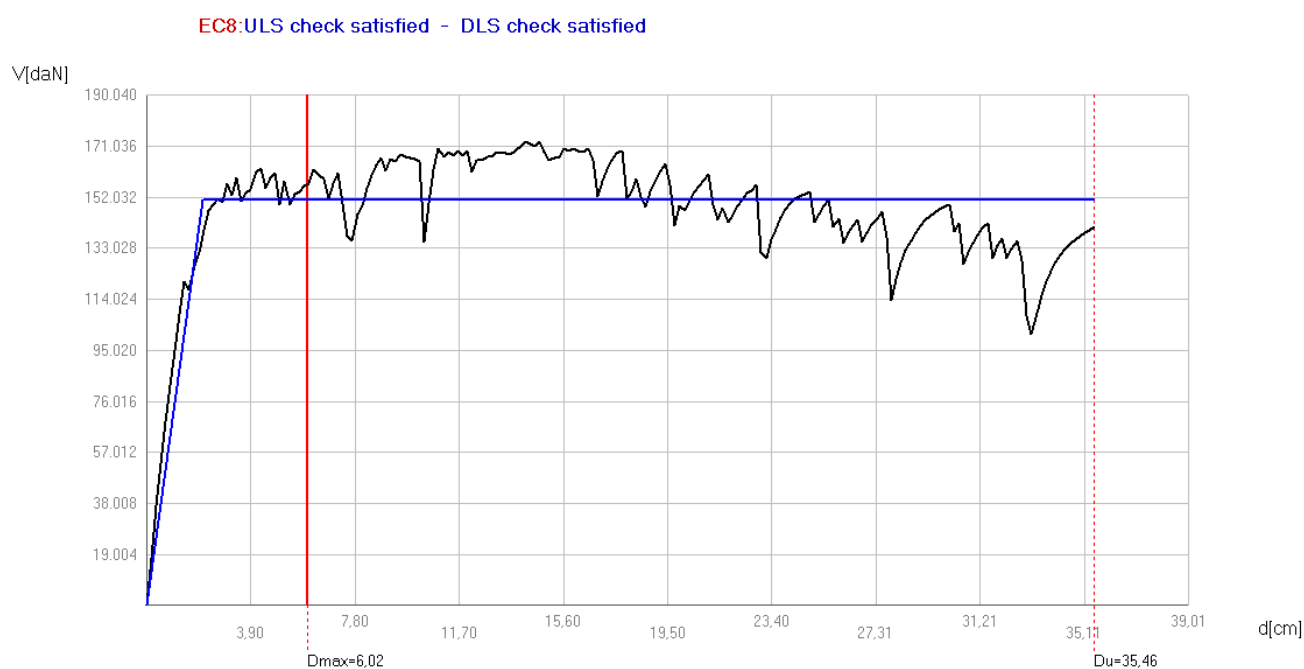


Figura8.9: Curva Pushover +X

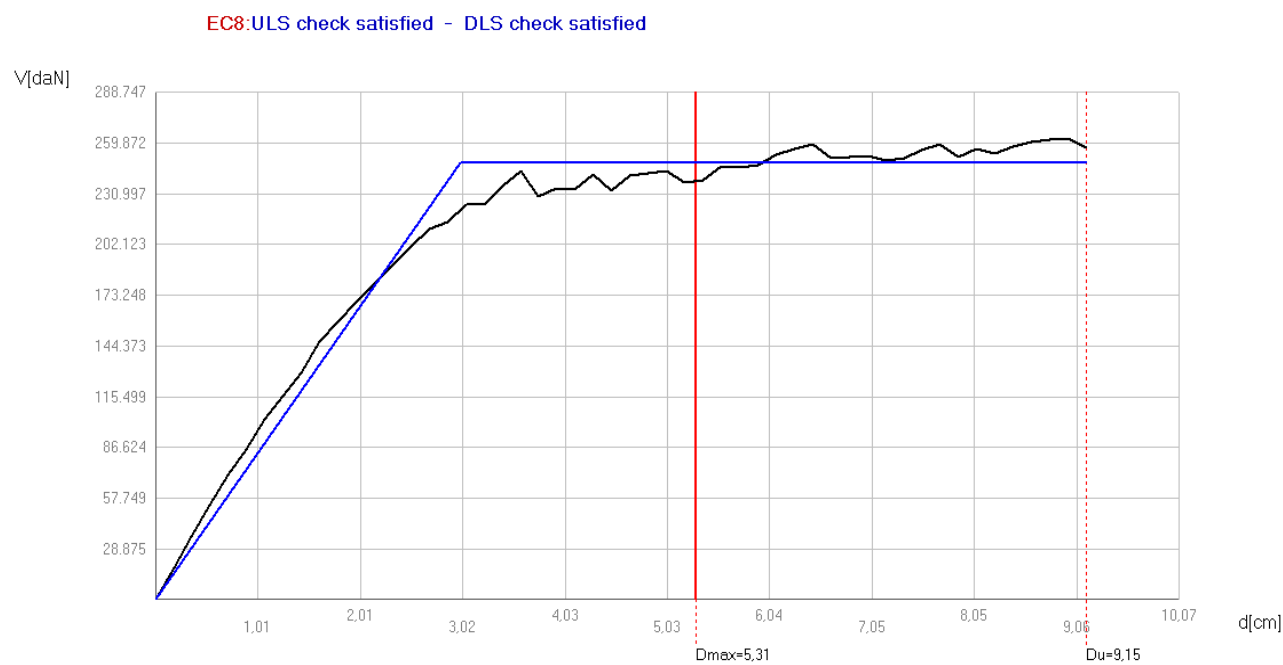


Figura8.10: Curva Pushover +Y

8.2. Puntos de desempeño

Para hallar el punto de desempeño se seguirán los pasos de la metodología N2 para el tratamiento de los resultados obtenidos de las curvas de capacidad y el espectro de demanda. Para realizar los cálculos propios de dicha metodología se utilizará la herramienta de cálculo Matlab. En este apartado se mostrará el procedimiento referente al edificio original de 7 niveles.

En la **Figura8.11** se nos muestra la curva de capacidad, desplazamiento en el techo vs. cortante basal, obtenida tras utilizar el criterio de corte, el cual estipula que tras reducirse un 20% el cortante máximo, se considera que el edificio ya no tiene resistencia alguna y los valores posteriores no son significativos [Cattari y Lagomarsino, 2013].

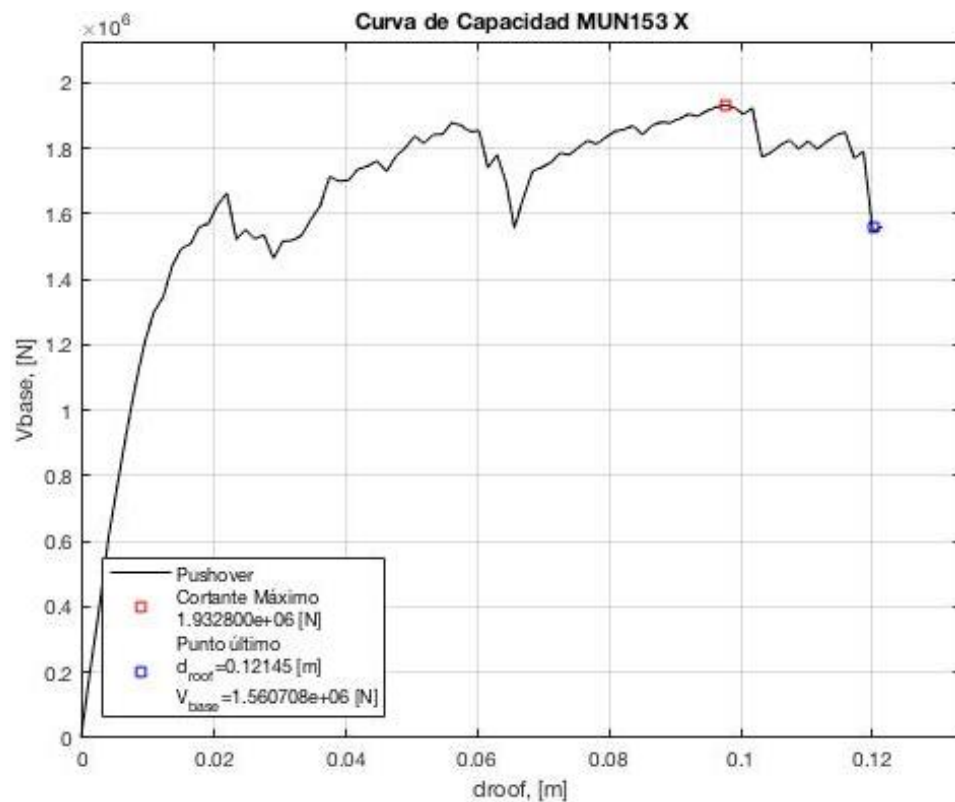


Figura8.11: Pushover con el criterio de corte del 20% de decaimiento del cortante máximo [fuente propia]

Como se ha explicado previamente, el método N2 requiere de la transformación de la curva de capacidad actual, la cual considera el modelo de múltiples grados de libertad (MDOF), a un sistema equivalente de un solo grado de libertad (SDOF) (**Figura8.12**), mediante el uso de distintas formulaciones que incorporan datos obtenidos de los análisis modales referentes a las masas y periodos fundamentales de vibración de la estructura.

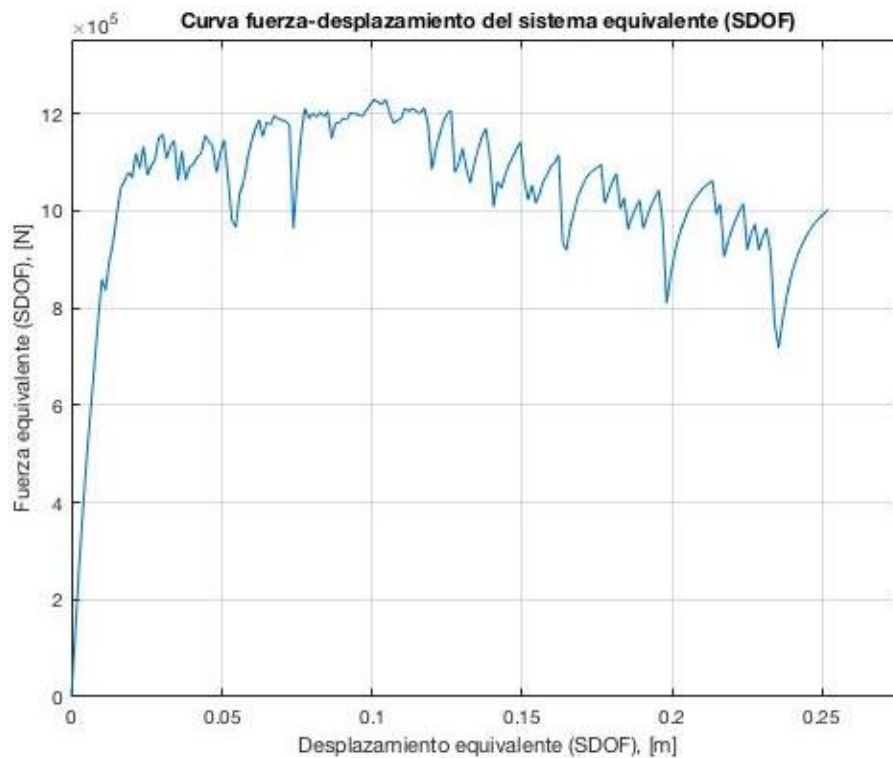


Figura8.12: Curva fuerza-desplazamiento equivalente SDOF [fuente propia].

Por último, para obtener el espectro de capacidad se dividirá en valor de las fuerzas equivalentes por la masa total equivalente del sistema (**Figura8.13**).

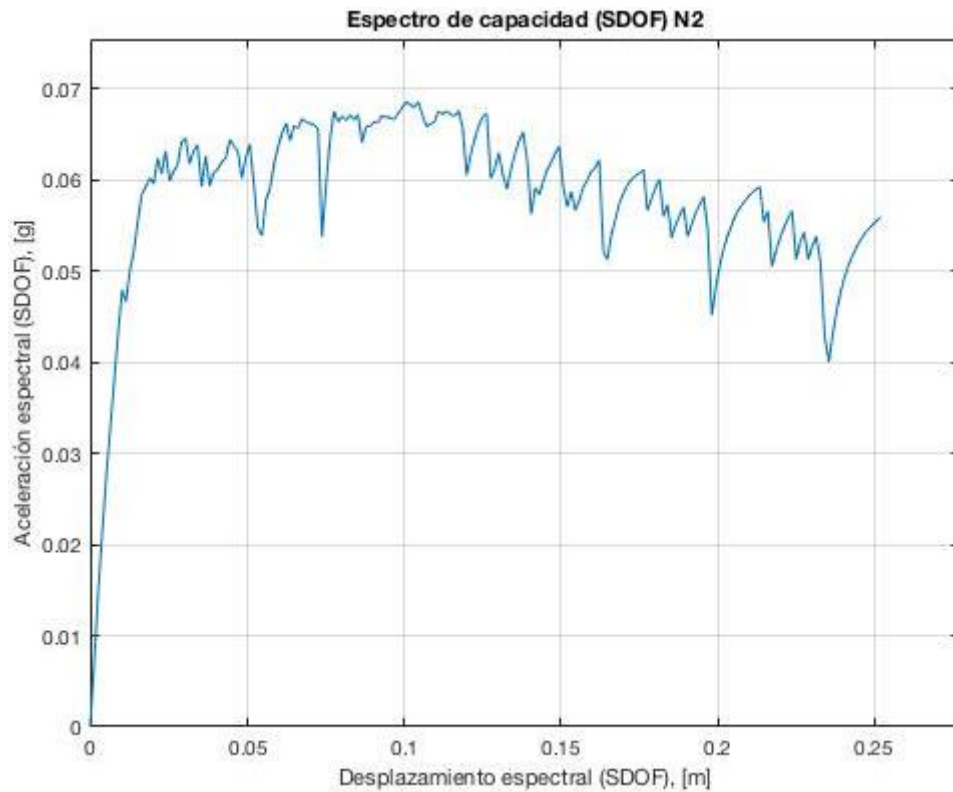


Figura8.13: espectro de capacidad [fuente propia].

Finalmente, una vez que la capacidad y la demanda se encuentran ambas en el formato desplazamiento-aceleración espectral (ADRS, por sus siglas en inglés), se realiza la comparación de las mismas en búsqueda del denominado punto de desempeño (performance point) del edificio al verse sometido a dicha acción sísmica de diseño. Se han calculado dos espectros de demanda para los valores de PGA 0,04g y 0,194g, los cuales corresponden a lo estipulado para aceleraciones esperadas del terreno en la NCSE-02 y los estudios de Irizarry (2004), respectivamente.

En la **Figura8.14** y **Figura8.15** se muestra gráficamente el punto de desempeño. Para su obtención se representa la bilineal elastoplástica obtenida con el pushover SDOF y el espectro elástico de la demanda.

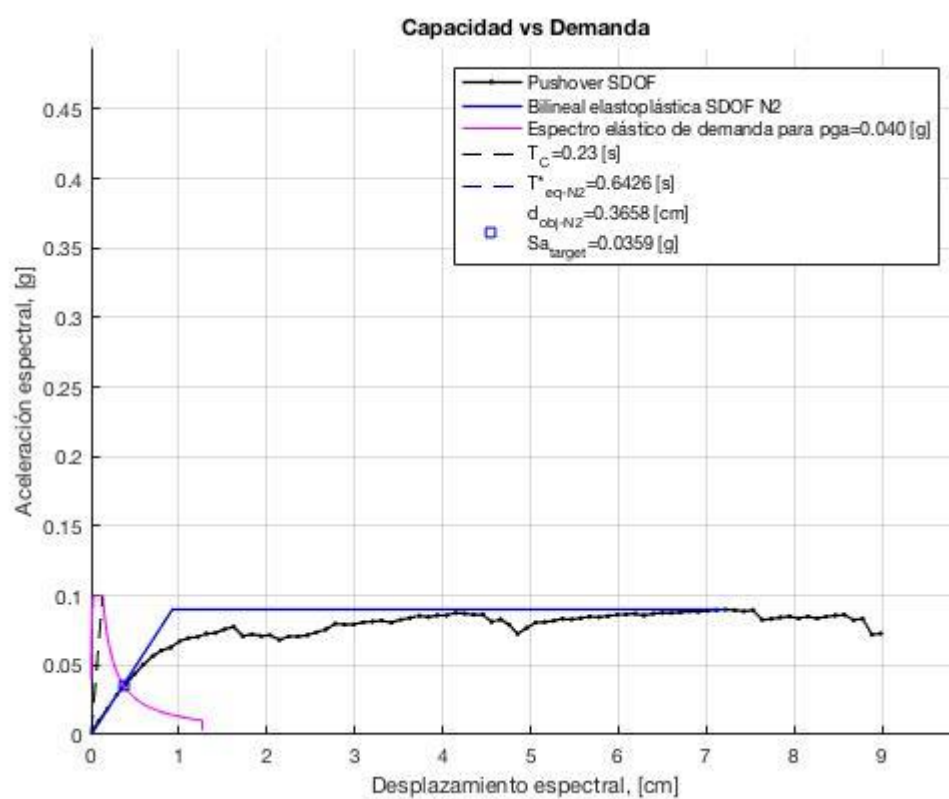


Figura8.14: obtención del punto de desempeño para $PGA=0,04g$ [fuente propia].

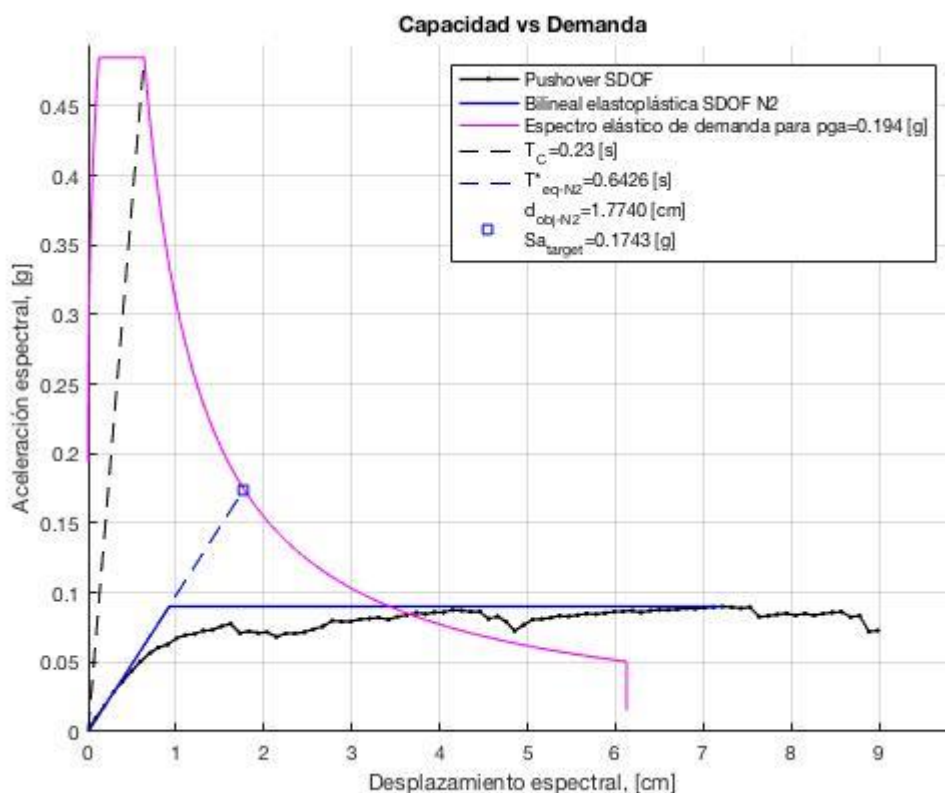


Figura8.15: obtención del punto de desempeño para PGA=0,194g [fuente propia].

Se puede observar que los desplazamientos espectrales obtenidos para ambas aceleraciones del terreno consideradas en el estudio son directamente proporcionales a las mismas, siendo importante la consideración de lo mismo en las siguientes evaluaciones del daño asociado a dichos desplazamientos.

8.3. Curvas de fragilidad

Las curvas de fragilidad (**Figura8.15**) nos dan información sobre las probabilidades de daño que puede sufrir la estructura. Estas curvas siguen una distribución de probabilidad tipo lognormal [HAZUS y FEMA, 1999]:

$$P\{ds|S_d\} = \Phi \left[\frac{1}{\beta_{ds}} \ln \left(\frac{S_d}{\overline{S_{d,ds}}} \right) \right]$$

Donde:

- S_d es el desplazamiento espectral o parámetro de la acción sísmica.
- $\overline{S_{d,ds}}$ es el valor medio del desplazamiento en el que el edificio alcanza un estado de daño ds .
- β_{ds} es la desviación estándar del logaritmo natural del desplazamiento espectral del estado de daño ds .
- Φ es la función de distribución acumulativa normal estándar.

Primeramente, y de acuerdo a lo descrito en el documento RISK-UE (2003), se definen 4 estados de daño (y un estado de daño nulo, S_{d0}) en función una variable de control (desplazamiento espectral en el techo, en nuestro caso): Dichos estados de daño atienden las siguientes formulaciones, las cuales se encuentran en función de los puntos de fluencia y último de la curva bilineal equivalente del sistema de un grado de libertad (SDOF) previamente obtenida:

Tabla8.1: Definición de los umbrales de daño [RISK-UE].

Umbrales de daño	Calculo del parámetro
Leve	$\overline{Sd_1} = 0.7 D_y$
Moderado	$\overline{Sd_2} = D_y$
Severo	$\overline{Sd_3} = D_y + 0.25(D_u - D_y)$
Completo	$\overline{Sd_4} = D_u$

De acuerdo a lo anterior, las curvas de fragilidad se calculan para cada estado de daño propuesto y los distintos puntos de desempeño obtenidos a partir de las metodología estática no-lineal N2 se localizan en ellas, para posteriormente hacer la lectura de la posibilidad de ocurrencia de cada uno de dichos estados (**Figura8.16**).

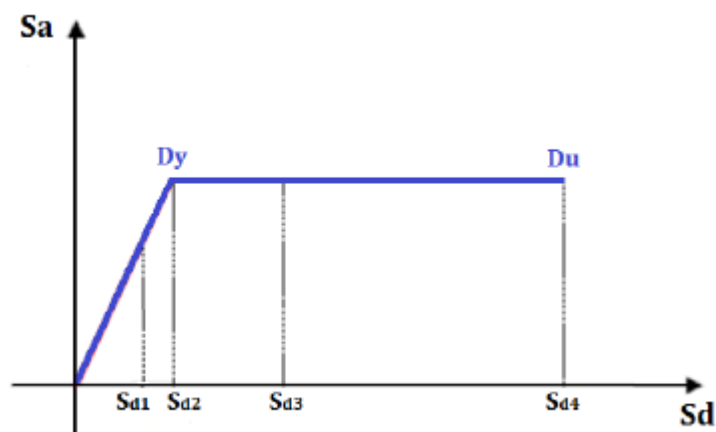


Figura8.16: Definición de los umbrales de los estados de daño a partir de la curva bilineal.

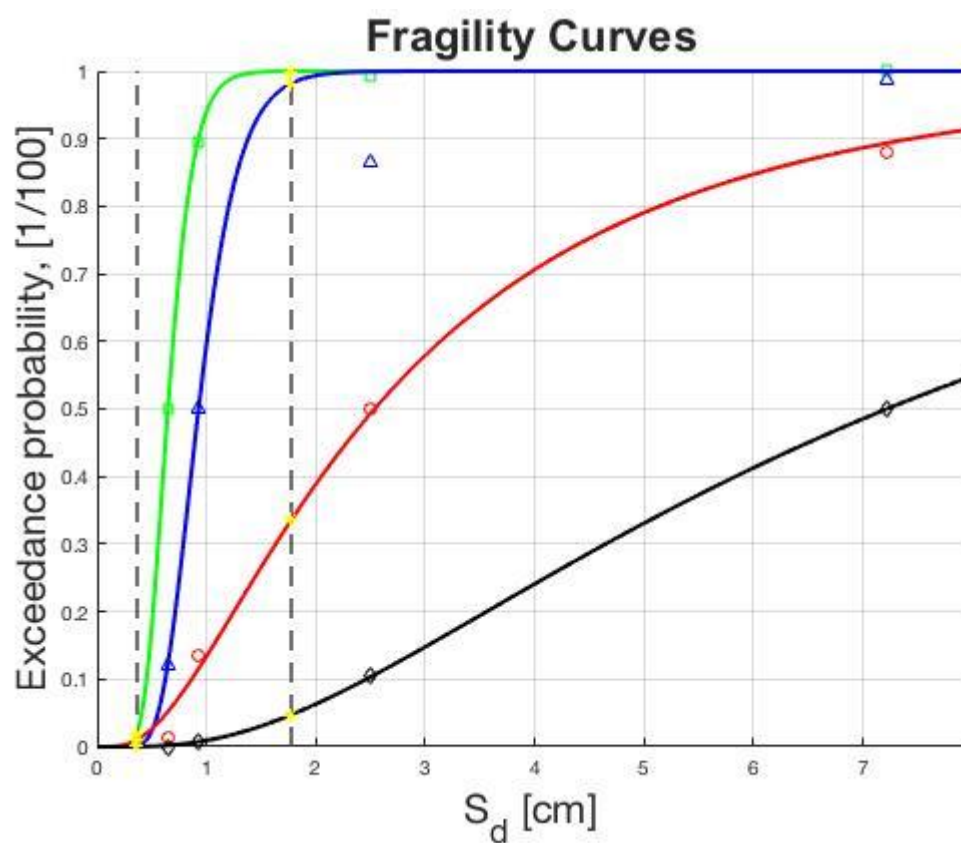


Figura8.15: Probabilidades para los PP de interés (PGA=0,04g y 0,194g) [fuente propia]

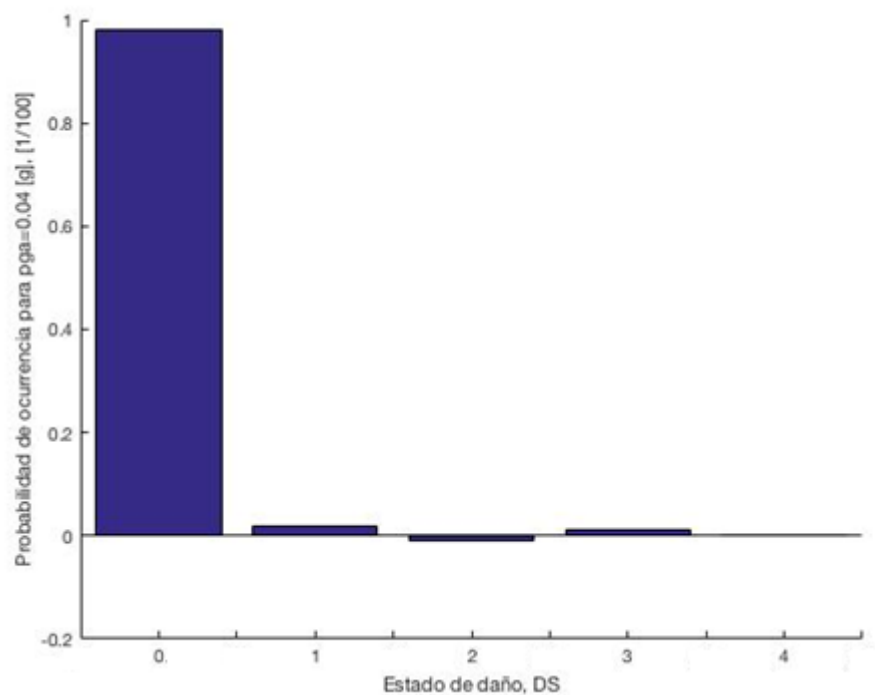


Figura8.16: Probabilidades de ocurrencia de cada estado de daño para PGA=0,04g [Fuente propia].

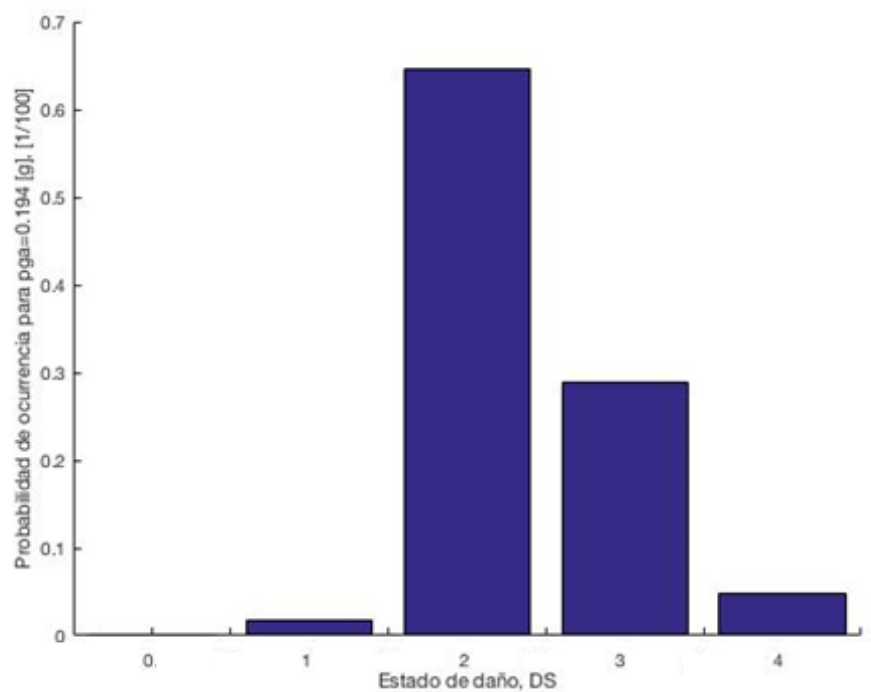


Figura8.17: Probabilidades de ocurrencia de cada estado de daño para PGA=0,194g [Fuente propia].

En la **Tabla8.2** se muestra la información numérica extraída de las curvas de fragilidad.

Tabla8.2: Probabilidades de igualar y superar los diferentes estados de daño para el escenario de Irizarry [Fuente propia]

PGA [g]	Nulo [%]	SL [%]	MO [%]	SE [%]	CO [%]	PP [cm]
0.04	97.97	1.90	1.00	1.00	0.00	0.5
0.194	0	1.80	64.6	28.8	4.74	2.4

Como es de esperarse, la aceleración de 0.194 g propuesta en los estudios de Irizarry (2004) se traduce en la aparición de mayores desplazamientos en el punto de desempeño (PP) y porcentajes de daño para estados de daño más severos, Dicha correlación determina la importancia de una correcta definición de dicho parámetro.

Lo anterior se observa para todos los modelos de este estudio, como se puede apreciar en el apartado de comparativa (Sección 8.5).

8.4. Comparativa

8.4.1. Análisis modal

En el siguiente apartado se expondrá una comparativa entre los resultados del análisis modal del edificio original de 7 niveles con los 3 modelos propuestos de 9 niveles (**Tabla9.1 y Tabla 9.2**).

Para los 3 modelos también se han identificado los 3 primeros modos fundamentales de vibración en cada dirección (X y Y) que activan más masa. Con esta comparativa se pretende estudiar la evolución del periodo según la diferencia de niveles y masa añadida a la estructura, así como su distribución. Se observa que el modelo en el que se hace el recortado igual al de las plantas anteriores tiene mayores periodos que los otros dos modelos y concretamente el recortado más recortado es el que menor periodo tiene de los 3 modelos.

Tabla9.1: Comparación entre los modos de los 4 modelos, en la dirección X

	Modo 1			Modo 2			Modo 3		
Modelo	T [s]	Mx [%]	My [%]	T [s]	Mx [%]	My [%]	T [s]	Mx [%]	My [%]
7 niveles (original)	0,6371806	86,69	0,39	0,226174	10,80	0,00	0,1196458	1,29	0,00
9 niveles	0,8451407	82,08	0,03	0,2947541	14,46	0,00	0,1498162	2,13	0,00
9 niveles recortado por delante y por detrás	0,7977227	81,74	0,07	0,2873732	14,08	0,00	0,1520046	2,09	0,11
9 niveles recortados frontalmente	0,823886	77,45	0,18	0,2890852	14,11	0,00	0,1499388	1,45	0,00

Tabla9.2: Comparación entre los modos de los 4 modelos, en la dirección Y

	Modo 1			Modo 2			Modo 3		
Modelo	T [s]	Mx [%]	My [%]	T [s]	Mx [%]	My [%]	T [s]	Mx [%]	My [%]
7 niveles (original)	0,6410766	0,43	78,17	0,2120054	0,00	15,29	0,1218196	0,00	5,23
9 niveles	0,8706732	0,03	76,92	0,2803021	0,00	14,43	0,1558848	0,00	4,59
9 niveles recortado por delante y por detrás	0,8138579	0,07	76,59	0,2715691	0,00	14,20	0,1621828	0,00	3,69
9 niveles recortados frontalmente	0,8354265	0,18	76,71	0,2755368	0,00	14,32	0,1635042	0,00	2,87

8.4.2. Punto de desempeño

Se presenta a continuación la comparativa de resultados obtenidos a partir de la metodología estática no-lineal empleada (método N2), en la cual a partir de las curvas de capacidad obtenidas para los diferentes modelos se obtienen los puntos de desempeño (performance point, PP) una vez se enfrentan la capacidad y la demanda a la que se ve sujeta la estructura en dicha zona.

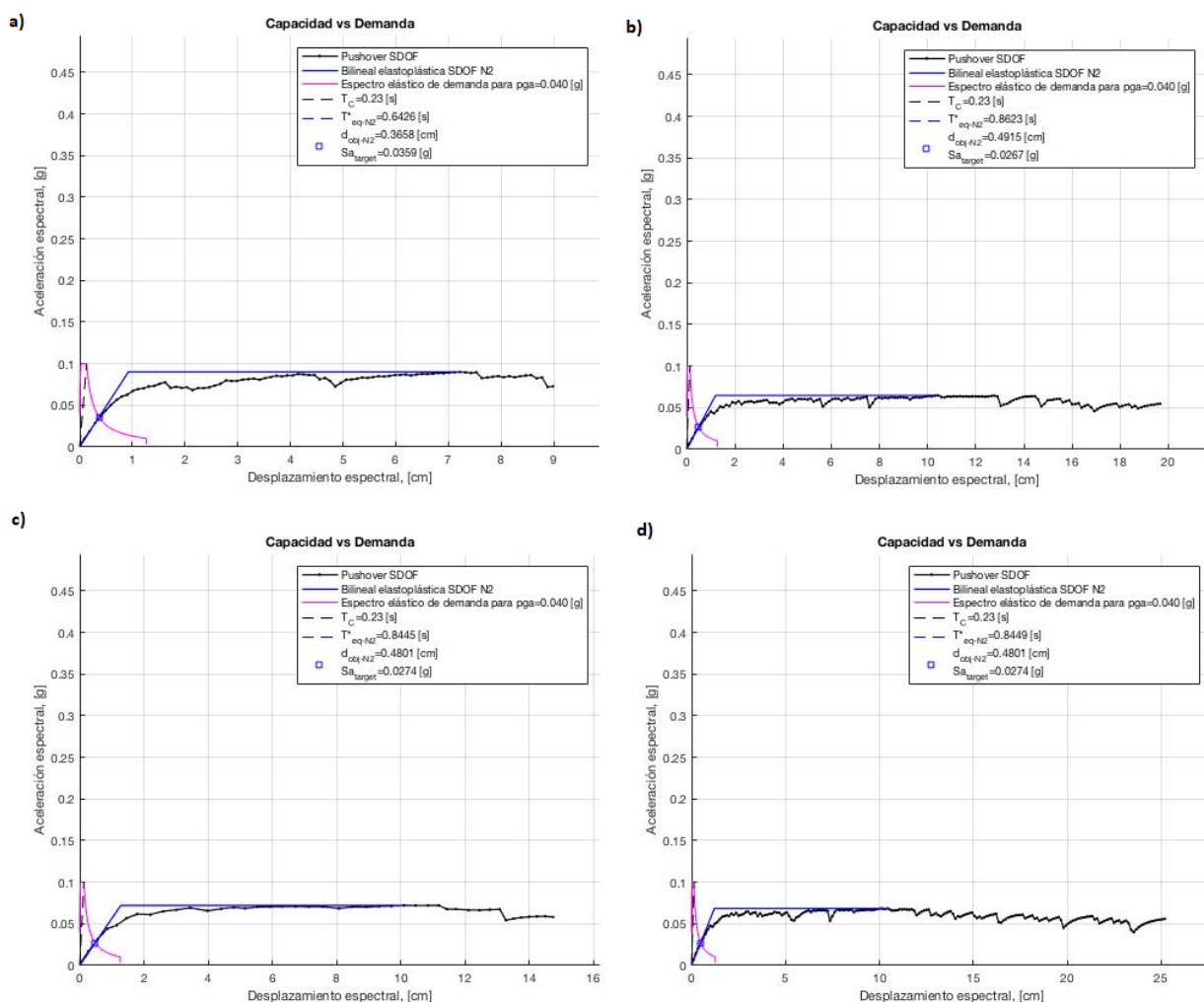


Figura9.1: comparativa punto de desempeño (PGA=0,04g) en dirección +X; a) original, b) modelo 1 (9 niveles), c) modelo 2 (9 niveles recortado frente y detrás), y d) modelo 3 (9 niveles recortado frente) [fuente propia]

Tabla9.3: Comparación entre los puntos de desempeño, en la dirección +X

PGA=0,04g	Sd (cm)	Sa (g)
7 niveles	0,3858	0,0359
Modelo 1	0,4915	0,0267
Modelo 2	0,4801	0,0274
Modelo 3	0,4801	0,0274

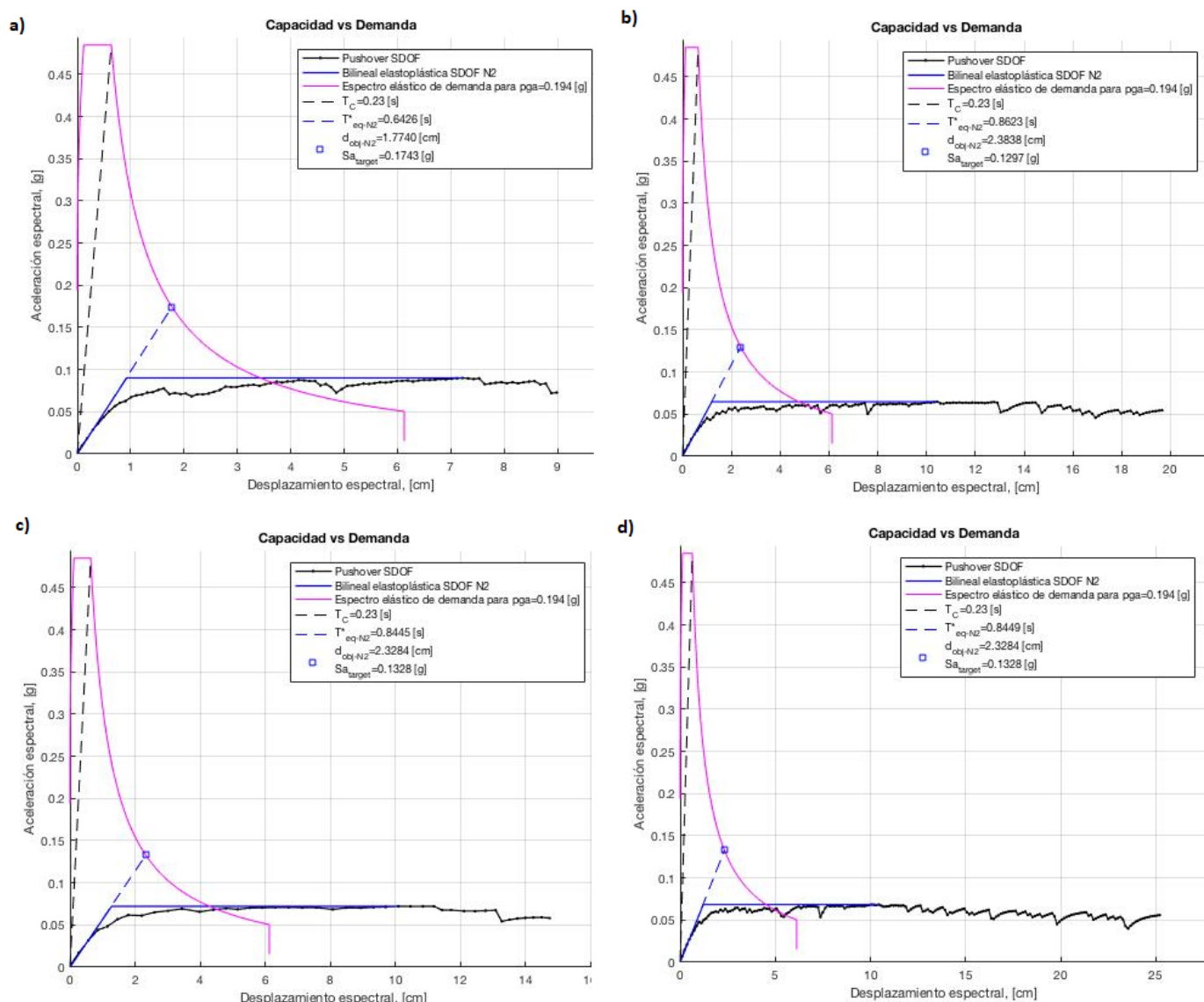


Figura9.2: comparativa punto de desempeño (PGA=0,194g) en dirección +X; a) original, b) modelo 1 (9 niveles), c) modelo 2 (9 niveles recortado frente y detrás), y d) modelo 3 (9 niveles recortado frente) [fuente propia]

Tabla9.4: Comparación entre los puntos de desempeño, en la dirección +X

PGA=0,04g	Sd (cm)	Sa (g)
7 niveles	1,774	0,1743
Modelo 1	2,3838	0,1297
Modelo 2	2,3284	0,1328
Modelo 3	2,3284	0,1328

Se puede apreciar que los modelos de 9 niveles presentan una mayor ductilidad (desplazamientos espectrales, Sd, superiores) que el modelo de 7 niveles. Así mismo, el cortante basal y por ende la aceleración espectral (Sa) son inferiores, siendo el edificio de 7 niveles más rígido. Tal como se comprobó en el análisis modal, los periodos del edificio aumentan conforme se aumenta la masa del mismo al añadir los niveles superiores.

Los resultados obtenidos para la aceleración del terreno propuesta por Irizarry (2004) son notablemente superiores a aquellos obtenidos utilizando la propuesta del NCSE-02.

8.4.3. Curva de fragilidad

Con el aumento de niveles vemos un desplazamiento en la disposición de la línea del punto de desempeño (PP) de los dos escenarios de PGA (**Figura9.3**). En Todos los modelos de recredo aumentan el S_d (cm), con lo cual vemos una tendencia evolutiva de los porcentajes de los estados de daño, tal como se aprecia también en los histogramas resultantes.

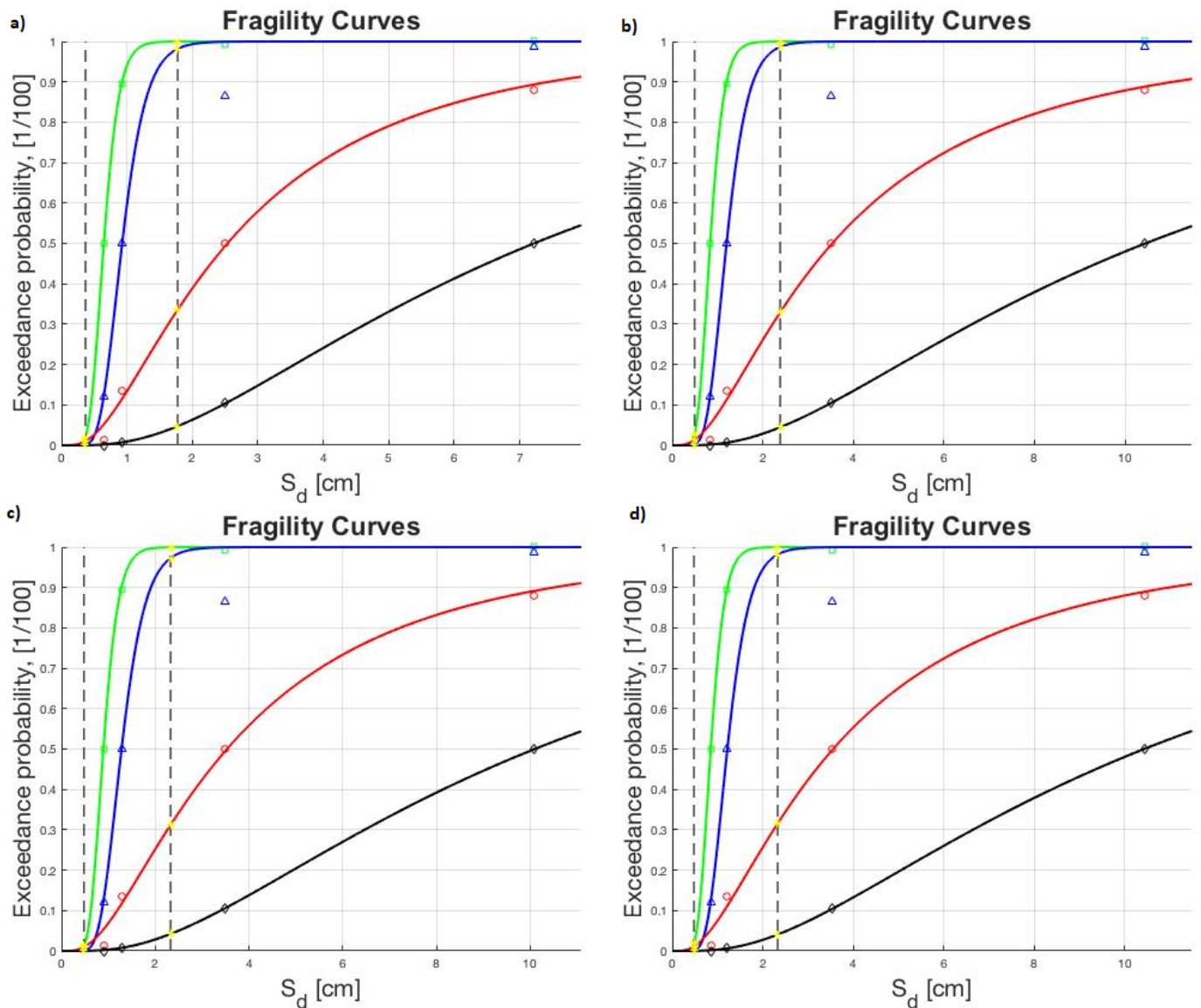


Figura9.3: comparativa curvas de fragilidad en dirección +X; a) original, b) modelo 1 (9 niveles), c) modelo 2 (9 niveles recortado frente y detrás), y d) modelo 3 (9 niveles recortado frente) [fuente propia]

8.4.4. Estado de daño

En la **Tabla9.5** se observa que la probabilidad de daño a medida que se aumenta los niveles disminuye en el estado 1 y aumenta en el estado 2.

Tabla9.5: comparativa estado de daño (PGA=0,04g) en dirección +X: modelo original, modelo 1 (9 niveles), modelo 2 (9 niveles recortado frente y detrás), y modelo 3 (9 niveles recortado frente)
[fuente propia]

MODELO	Nulo [%]	SL [%]	MO [%]	SE [%]	CO [%]
7 niveles	97,97	1,90	0,5	0,5	0
Modelo 1	98,69	1,23	0,01	0,01	0,01
Modelo 2	97,78	2,06	0,55	0,55	0,02
Modelo 3	97,25	2,55	0,6	0,6	0,02

En la **Tabla9.6** podemos observar que a medida que se añaden niveles la probabilidad del daño en el estado 3 aumenta ligeramente mientras se reduce en los otros estados.

Tabla9.6: comparativa estado de daño (PGA=0,194g) en dirección +X: modelo original, modelo 1 (9 niveles), modelo 2 (9 niveles recortado frente y detrás), y modelo 3 (9 niveles recortado frente)
[fuente propia]

MODELO	Nulo [%]	SL [%]	MO [%]	SE [%]	CO [%]
7 niveles	0,1	1,80	64,63	28,80	4,74
Modelo 1	0,03	2,67	66,07	27,01	4,22
Modelo 2	0,01	1,66	66,33	27,82	4,16
Modelo 3	0,01	1,32	65,73	28,46	4,47

Conclusiones

Alrededor de un 70% de los edificios del distrito de L'Eixample son de mampostería no reforzada de finales del siglo XIX y/o principios del siglo XX. Por lo que estos edificios tienen una gran importancia en el parque urbano de la ciudad y su evaluación es necesaria.

En este estudio se ha estudiado la vulnerabilidad sísmica de un edificio típico y suficientemente representativo del barrio de L'Eixample, cuya construcción es previa a las primeras normas sísmicas, lo cual conlleva que en dicho entonces sólo se contemplaban las fuerzas verticales que podían afectar a la estructura, obviando los esfuerzos horizontales que provocan los sismos.

Algo que puede observarse en muchos de estos edificios es que sus proyectos originales han sido recrecidos a medida que la normativa iba evolucionando, generando así edificios con hasta 3 o 4 plantas añadidas a manera de pisos, áticos o sobreáticos. De ahí el interés del presente trabajo en realizar un recrecido en un edificio de este tipo y observar los cambios en su comportamiento así como los daños que podrían inducirse por dicho recrecido.

Las propiedades mecánicas de los materiales del proyecto del edificio original se han establecido han sido tomadas como los valores medios del estudio estadístico realizado en otros trabajos, los cuales consideraron la gran variabilidad de dichas propiedades dadas las técnicas de fabricación manual de la época de interés. Así mismo, para este estudio no se ha considerado la variabilidad de dichas propiedades en los distintos niveles de un mismo nivel, ni la variabilidad que se ha observado en distintas alturas.

Así mismo, el edificio ha sido modelado de manera aislada, sin tomar en cuenta los edificios aledaños con quien es común que compartan paredes medianeras. Lo anterior se debe a limitaciones en los programas de cálculo, no obstante, dicho caso se presenta comúnmente a día de hoy en aquellos edificios que quedan desligados de la manzana debido a derribos de edificios contiguos.

El análisis se ha realizado teniendo en cuenta las direcciones X e Y, pero solo se ha mostrado los resultados en la dirección X por ser más significativa ya que es una dirección más esbelta y por ende menos rígida.

Respecto a los resultados obtenidos según la normativa NSCE-02 e Irizarry, vemos una diferencia importante entre los distintos resultados. Lo anterior era de esperar debido a la gran diferencia entre los valores de PGA de dichos estudios. Esto demuestra la importancia de una selección adecuada de estos valores según su zona geográfica y la normativa a emplear.

Aun con los puntos de desempeño diferentes encontrados para las dos normativos, se puede observar que estos desempeños son directamente proporcionales entre Irizarry y NSCE-02. También se puede observar la diferencia entre el modelo original y cualquiera de los recrecidos. Con el aumento de niveles se observa el punto de desempeño un crecimiento en el desplazamiento espectral

PGA=0,04g	Sd (cm)
7 niveles	1,774
Modelo 1	2,3838
Modelo 2	2,3284
Modelo 3	2,3284

Otro dato interesante que podemos sacar del estudio es que a medida que aumenta el número de pisos, aumenta el periodo del modo fundamental de vibración. De esta manera confirmamos que a medida de que se aumentan las masas y la altura de una estructura, los periodos de vibración se ven afectados directamente, es decir, la estructura vibra de distinta manera.

Finalmente, por lo que respecta al estado de daño, se puede observar que a medida que se añaden niveles la probabilidad de daño para Irizarry se acentúa aún más en el estado 2 (moderado).

Referencias bibliográficas

Josep Emilo Hernández-Cros, Gabriel Mora, Xavier Pouolana, Art. *La construcción de la ciudad de Barcelona 1716-1977*

Art. *Las nuevas tipologías en la construcción de la Barcelona de cerdà o un catálogo de arquitectura de la ciudad industrial*, 1855-1888

Fajfar, P. y Gaspercic, P. "The N2 method for the seismic damage analysis of RC buildings". *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 25, 1996, pp 23-67.

L. G. Pujades, A. H. Barbat, R. González-Drigo, J. Avila, S. Lagomarsino *Seismic performance of a block of buildings representative of the typical construction in the Eixample district in Barcelona (Spain)* (2010)

Marc Llòria Bisbal, *Estudi de la capacitat, fragilitat i vulnerabilitat sísmica d'un edifici* (2016)

Artur Romero Llado, *Estudio de la capacidad, fragilidad y vulnerabilidad sísmicas de un edificio* (2016)

María Andrea Martínez Castillo, *Evaluación del uso de espectros de diseño al análisis del riesgo sísmico. Aplicación a Barcelona (España)*. (2009)

Edgar Mora Martínez, *Programa curva de capacidad pushover elemental* (2015)

Máximo G. Peralta Álvarez, *Análisis estático no lineal y análisis dinámico no lineal del hospital de vielha* (2012)

R. Gonzalez-Drigo, J. Avila-Haro, L.G. Pujades and A.H. Barbat, *Non-linear static procedures applied to high-rise residential URM buildings* (2016)

C. Cornadó Bardón, *Classificació i anàlisi tipològica dels edificis de l'Eixample construïts entre 1860 i 1936*. Projecte final de màster UPC, Barcelona, (2009).

Irizarry et al. *Analytical formulation for the elastic acceleration-displacement response spectra adapted to Barcelona soil conditions*, Technical Report, Instituto Cartografico de Cataluña., (2003)

Cid et al. *Seismic zonation of Barcelona based on numerical simulation of site effect*. *Pure Applied Geophisic*, (2001)

Maria Andrea Martínez Castillo, *Evaluación del uso de espectros de diseño al análisis del riesgo sísmico. Aplicación a Barcelona (España)* (2009)

Nicolas Guevara Morales, *Evaluacion de la capacidad estructural del edificio de la biblioteca de las ingenierías y arquitectura, utilizando análisis estatico no lineal (Pushover)*, (2006)

Otras referencias

<http://lameva.barcelona.cat/eixample/ca/historia-del-districte> (2017)

https://www.fomento.gob.es/MFOM/LANG_CASTELLANO/ORGANOS_COLEGIADOS/MASORGANOS/CPNS/NORMATIVA/ (2017)

<http://www.ecbarquitectura.com/#/> (2017)

